



Pilotprogramm Anpassung an den Klimawandel Mit kühlen Strassenbelägen den Effekt von Hitzeinseln reduzieren

Bundesamt für Umwelt BAFU
Sektion Klimaberichterstattung und -anpassung

A5572
30. März 2021

Impressum

Auftraggeber



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Ein Projekt im Rahmen des Pilotprogramms
Anpassung an den Klimawandel,
unterstützt durch das Bundesamt für
Umwelt (BAFU)

Finanziert durch

Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Kanton Wallis
Kanton Bern
Stadt Zürich

Begleitgruppe

Roland Hohmann, Sektion Klimaberichterstattung und -anpassung (BAFU)
Alain Cuche, Investitionsplanung /Stab West (ASTRA)
Lucien Pignat, Département de la mobilité, du territoire et de l'environnement (Kt. Wallis)
Thomas Schmid, Bau- und Verkehrsdirektion (Kt. Bern)
Martin Horath, Tiefbauamt Stadt Zürich

Projektteam

Erik Bühlmann (G+P)
Vincent Roth (G+P)
Johannes Schindler (G+P)
Tobias Balmer (Weibel AG)

Version	Datum	Autoren	Beschrieb	Verteiler
V 1.0	27.05.2021	Vincent Roth	Endfassung	BAFU, Weibel AG, Kt. BE, Kt. VS

Zusammenfassung

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 diesem Projekt soll die Minderung des Hitzeinseleffektes unter Berücksichtigung der primären Funktion von Strassenoberflächen primär durch eine Erhöhung der Albedo und der damit einhergehenden Absenkung der Oberflächentemperatur und schliesslich einer Reduktion des Wärmespeichers geschehen.

In Anbetracht der Tatsache, dass der Hitzeinseleffekt vornehmlich Standorte innerhalb von Städten und Agglomerationen mit hoher Bevölkerungsdichte betrifft, wird eine Kombination von kühlenden Belägen mit lärmarmen Belägen als Ideallösung angestrebt.

In diesem Projekt wurden an zwei Standorten in Bern und Sion verschiedene Belagstypen (SDA und SMA) mit unterschiedlichen kühlenden Technologien eingebaut und deren Effektivität hinsichtlich einer kühlenden Wirkung untersucht. Dazu wurden die Belagsabschnitte während mehrerer Wochen mittels Infrarotkamera und Temperatursensoren in den Belägen überwacht.

Die Auswertung der Datenaufzeichnung der Belagsoberflächen und der Temperaturen in den Belägen zeigt eine deutliche Wirkung im Vergleich zu den unbehandelten Referenzbelägen. So wurden Temperaturabweichungen von bis zu maximal 12 °C zur wärmsten Tagesstunde (17 Uhr) beobachtet und eine mittlere Abweichung über einen Zeitraum von 24 Stunden von bis zu 7.9 °C.

Es zeigt sich, dass dichte Beläge mit einer Aufhellung der Oberfläche und einer Veränderung der Albedo bereits eine signifikante kühlende Wirkung haben. Es zeigt sich auch, dass poröse Beläge eine noch bessere Wirkung aufweisen wegen des höheren Hohlraumgehalts in der Oberflächenstruktur.

Aspekte wie die Beständigkeit der Bauweise und die Applikation auf lärmarmen Belägen wurden auch untersucht. Es zeigt sich, dass hierbei keine Einschränkungen zu erwarten sind.

Durch den kurzen Untersuchungszeitraum können keine Aussagen hinsichtlich der Langlebigkeit der Beläge oder deren akustischen Verschleiss gemacht werden.

Inhalt

1.	Ausgangslage und Projektziel.....	6
1.1	Projektziel.....	6
1.2	Klimaentwicklung Schweiz.....	6
2.	Stand der Forschung.....	8
2.1	Wärmeinseln.....	8
2.2	Kühlende Strassenbeläge.....	8
2.3	Die Anwendung von kühlenden Belägen in der Schweiz.....	8
3.	Messaufbau und meteorologische Bedingungen.....	9
3.1	Standort Bern.....	9
3.2	Standort Sion.....	10
3.3	Die Meteorologie im Sommer 2020 in der Schweiz.....	12
4.	Messmethoden und Datenaufbereitung.....	14
4.1	Infrarotkameras.....	15
4.2	Temperatursonden im Belag.....	15
4.3	Albedobestimmung durch Bildanalyse.....	16
4.4	CPX-Messungen.....	17
4.5	Aufgezeichnete Daten.....	18
4.6	Auswertung der Daten.....	18
5.	Resultate.....	19
5.1	Beläge mit Farbanstrich.....	19
5.2	Farbbeläge.....	21
5.3	Beläge mit Abstreuerung.....	24
5.4	Beläge mit Kornersatz.....	26
5.5	Weitere relevante Aspekte der kühlenden Beläge.....	29
5.6	Praktische Aspekte Belagstypen.....	32
6.	Schlussfolgerungen.....	33
6.1	Empfohlene Technologien nach Anwendungsbereich.....	33
6.2	Ökologische Aspekte.....	34
6.3	Weitere erforderliche Arbeiten.....	34
7.	Bibliografie.....	36

Anhang

I	Stündliche Mittelwerte aller Beläge an Tagen mit $T_{max} > 30\text{ °C}$ in Bern.....	38
II	Stündliche Mittelwerte aller Beläge an Tagen mit $T_{max} > 30\text{ °C}$ in Sion.....	42
III	Rohdatei Aufzeichnung Infrarotkamera.....	44
IV	Visualisierung Rohdaten Aufzeichnung Belagssonden (MSR).....	46

V	CPX Messungen Bern	48
VI	CPX Messungen Sion	49
VII	Albedo Messungen und Berechnungen Bern.....	50

1. Ausgangslage und Projektziel

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 (vgl. mit den langjährigen Mittelwerten, Bundesamt für Umwelt BAFU, 2018). In den letzten 25 Jahren, insbesondere in den Sommern 2003 und 2015, lag die Temperatur deutlich über dem Mittelwert der meteorologischen Referenzperiode 1961-1990. Zudem sind seit Ende der 1980er Jahre kalte Sommer mit Durchschnittstemperaturen unter dem Wert der Referenzperiode ausgeblieben. In städtischen Gebieten wird die Sommerhitze durch den Hitzeinseleffekt verstärkt. Dieser besteht darin, 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.

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 verstärkt.

1.1 Projektziel

Das Hauptziel des Projekts ist es, zu testen, wie sich verschiedene Strassenbeläge bei Sonnenschein erwärmen und den vom Hitzeinseleffekt betroffenen Gemeinden und Städten ein Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, welches es ihnen erlaubt, die Fragen zur Anwendung und Nutzung unterschiedlicher Lösungen für kühle Beläge zu beantworten und die situationsspezifische Auswahl der geeigneten Massnahme zur Minderung des Hitzeinseleffektes zu finden.

Die Minderung des Hitzeinseleffektes soll unter Berücksichtigung der primären Funktion von Strassenoberflächen primär durch eine Erhöhung der Albedo geschehen, wodurch die Oberflächentemperatur und die gespeicherte Wärme gesenkt werden. In Anbetracht der Tatsache, dass der Hitzeinseleffekt vornehmlich Standorte innerhalb von Städten und Agglomerationen mit hoher Bevölkerungsdichte betrifft, wird eine Kombination von kühlenden Belägen mit lärmarmen Belägen als Ideallösung angestrebt. Durch eine solche Kombination können im urbanen Raum zwei Probleme simultan gelöst werden. Versuche aus den Vereinigten Staaten zeigen, dass poröse Beläge generell ein höheres Potenzial für eine kühlende Wirkung haben (Stempihar et al., 2012).

1.2 Klimaentwicklung Schweiz

In der Schweiz ist an den meisten Stationen ein Trend zu mehr Hitzetagen und weniger Frosttagen zu beobachten. Ein räumlicher Vergleich zeigt, dass der Trend zu intensiveren Hitzetagen über Mitteleuropa in einem globalen Kontext sogar besonders ausgeprägt ist und weltweit nahezu einmalig für dicht besiedelte Gebiete ist (Donat et al., 2013; Scherrer et al., 2016).

Die Änderung von Temperaturextremen wird auch für die Schweiz erwartet. Gemäss der aktuellen Klimaszenarien CH2018 wird sich der Trend zu mehr Hitzetagen und weniger Frosttagen in Zukunft fortsetzen (NCCS, 2018). Gleichzeitig werden die Folgen der Hitzeextremen stärker steigen als die entsprechenden Mitteltemperaturen. Mit der zunehmenden Hitze und der steigenden Luftfeuchtigkeit nimmt auch der Hitzestress für Mensch und Tier zu. Nächte und Tage mit hoher Temperatur und Luftfeuchtigkeit stehen in engem Zusammenhang mit erhöhter Atemwegs- und Herzkreislauferkrankungen und Sterblichkeit (Office fédéral de l'environnement (BAFU/OFEV), 2018; Ragetti & Rösli, 2019;

Vicedo-Cabrera et al., 2016). Insbesondere in tiefen Lagen im Mittelland oder Tessin wird eine deutliche Zunahme des Hitzestresses erwartet.

Insbesondere ältere Menschen und Kleinkinder sind von den Folgen stärker betroffen (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2018, 2020). Aufgrund der genannten Faktoren kann es zu einer sogenannten Übersterblichkeit führen, wie in den Rekordsommern 2003 und 2015 mit einer Zusatzsterblichkeit von 6.9 %, respektive 5.4 % (Ragettli et al., 2017; Ragettli & Rösli, 2019).

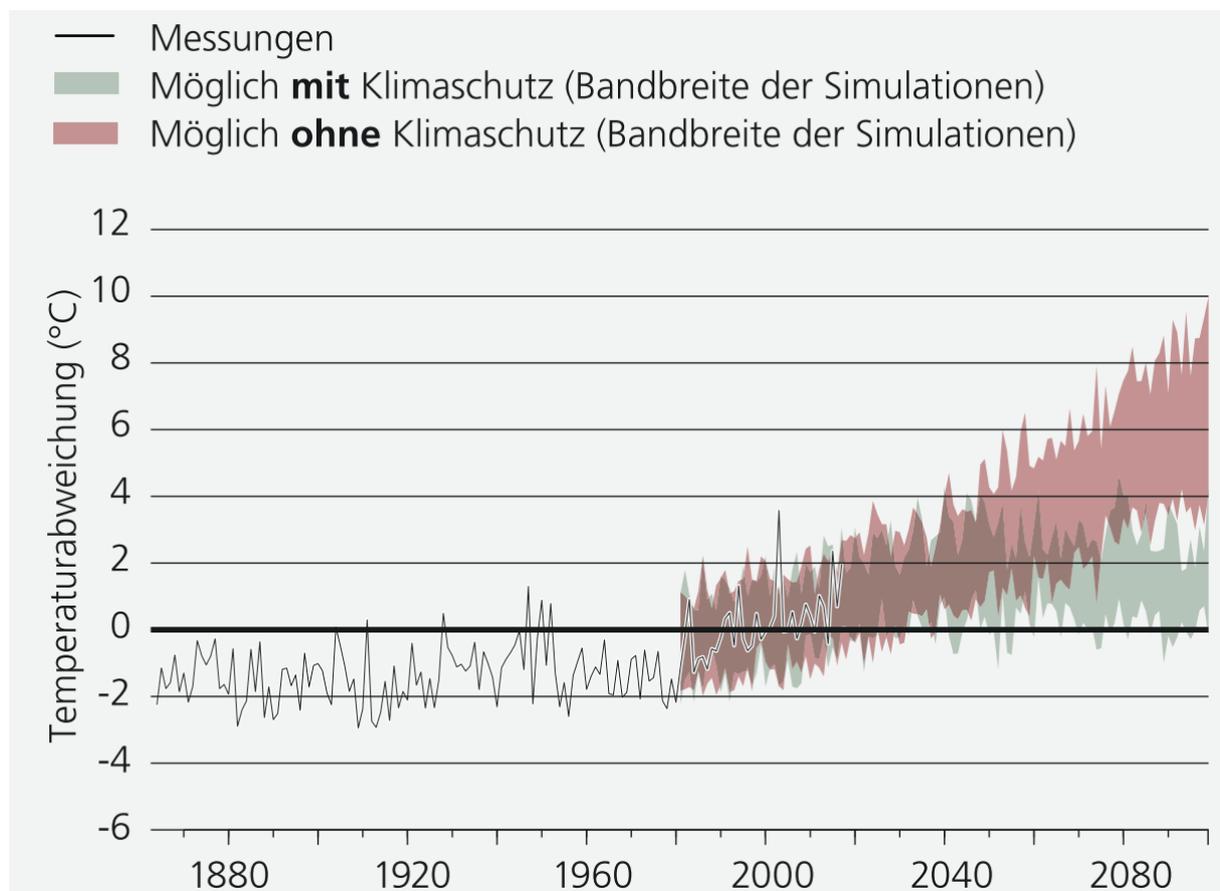


Abbildung 1: Vergangene und zukünftige Änderungen der Temperatur in der Schweiz (Quelle: NCCS, 2018)

Die Schweiz ist überdurchschnittlich vom Klimawandel betroffen (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2020). Die jährliche Anzahl Hitzetage (Tage mit einer Maximaltemperatur von 30 °C und mehr) hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Während in Lugano in den 1960er-Jahren im Durchschnitt 8 Hitzetage pro Jahr auftraten, könnten es zukünftig 23-31 sein (NCCS, 2018). Ebenfalls hat sich die Jahresdurchschnittstemperatur seit der vorindustriellen Zeit um rund 2 °C erhöht. Das ist gut doppelt so viel wie der Anstieg der mittleren globalen Temperatur.

2. Stand der Forschung

2.1 Wärmeinseln

Bereits 1997 untersuchten Rosenfeld et al. die Auswirkungen von Städten auf die Wärmeentwicklung im urbanen Raum. Dabei stellten sie fest, dass rund 90% der Temperaturzunahme über Städten von den Baumaterialien, welche verwendet werden und lediglich 10% aus Emissionen von Fahrzeugen, Häusern und Fabriken stammt. Dies aufgrund der Materialien, welche Wärme aufnehmen und speichern ohne Verdunstungskühlung zu gewährleisten. In Städten sind rund 25% bis 45% der Oberflächen versiegelt, sei dies mit Hausdächern oder Strassen (Santamouris, 2007; Stempihar et al., 2012), was in Kombination mit Absorption von Sonneneinstrahlung, dem Fehlen von Grünflächen und der Entstehung von Strassenschluchten zu einer erhöhten Temperatur führt (Grimmond et al., 2016; M. Santamouris et al., 2011; Zhou et al., 2013). In einer Studie von Christen & Vogt (2004) wurden in Basel eine Erwärmung durch den Hitzeinseleffekt von bis zu 3 °C festgestellt.

2.2 Kühlende Strassenbeläge

Kühlende Beläge haben ein höheres solares Reflexionsvermögen (Albedo) als konventionelle Beläge. Dies wird entweder durch den Einsatz hellerer Materialien an der Oberfläche erreicht oder aber durch die Aufhellung eines dunklen Belags mittels Farbanstrich oder nachträglicher Abstreuerung von hellem Gestein (Ferrari et al., 2020). Die Albedo heller Beläge schwanken zwischen 0.2 und 0.3 für rote und grüne Oberflächen und 0.6 bis 0.7 für graue und weissliche Beläge, während herkömmliche neu asphaltierte Beläge unter 0.1 liegen (H. Akbari et al., 2001; Carnielo & Zinzi, 2013).

Kühlende Strassenbeläge werden seit vielen Jahren erforscht. Dabei geht es primär darum, die Hitze in Städten zu reduzieren, ohne die Sichtbarkeit auf der Strasse zu beeinträchtigen. So haben Forschende in Japan bereits 2004 (Kinouchi et al., 2004b) eine Studie zu Farbbeschichtungen mit hoher Albedo¹ und tiefer Helligkeit untersucht. Daraus resultierte die Erkenntnis, dass sich eine hohe Belags-Albedo positiv auf die Lufttemperatur an der Belagsoberfläche auswirkt, dass jedoch die Belagsoberfläche mehr Strahlung reflektiert und somit die Wärmebelastung am menschlichen Körper steigen kann. Kyriakodis & Santamouris (2018) untersuchten den Einbau von kühlenden Oberflächen auf über 37'000 m² in Athen und konnten eine Reduktion der Umgebungstemperatur von bis zu 1.5 °C und eine maximale Temperaturdifferenz von 11.5 °C an der Oberfläche feststellen. Stempihar et al. (2012) untersuchten 2012 den Einfluss von porösen Asphalten auf den Hitzeinseleffekt und kamen zur Erkenntnis, dass diese eine höher Tagestemperatur aufwiesen durch den reduzierten thermischen Energietransport von der Oberfläche in die unteren Schichten. Dieselben Beläge wiesen hingegen in der Nacht eine tiefere Temperatur auf als andere Materialien mit derselben oder einer höheren Albedo. Die ist auf die besseren Isoliereigenschaften der porösen Beläge durch den hohen Luftporengehalt zurückzuführen.

2.3 Die Anwendung von kühlenden Belägen in der Schweiz

Die Anwendung von kühlenden Belägen in Schweizer Städten ist bis zum heutigen Tag nicht grossflächig erfolgt. In der Schweiz haben hauptsächlich die Städte Basel (1998), Zürich (2010), Sion (2017) sowie die Kantone Solothurn (2001), Genf (2015) und Zürich (2018) Massnahmen publiziert, welche zu

¹ Rückstrahlungsvermögen von nicht selbstleuchtenden, diffus reflektierenden Oberflächen (z. B. Schnee, Eis). Dabei gilt der Wert 1 als absolut reflektierend (Schnee 0.8-0.9) und der Wert 0 als absolut absorbierend (Asphalt 0.15).

Eindämmung von Wärmeinseln beitragen sollen (Office fédéral de l'environnement (BAFU/OFEV), 2018). Keine der Massnahmen bezieht sich auf den Einbau von kühlenden Belägen im urbanen Bereich. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Massnahme und deren Effektivität in schweizerischen Kontext eher unbekannt ist. Dieses Projekt hat zum Ziel, Grundlagen für die verbreiteter Anwendung von kühlenden Belägen im urbanen Bereich als Ersatzmassnahme von herkömmlichen Belägen bereitzustellen.

3. Messaufbau und meteorologische Bedingungen

Um der Thematik gerecht zu werden, wurden zwei Standorte ausgewählt, welche sich klimatisch stark unterscheiden. Beide Standorte entsprechen nicht ganz den Kriterien einer urbanen Umgebung (Strassenschlucht, Versiegelung, im Stadtzentrum). Trotzdem sind Rückschlüsse zur kühlenden Wirkung der eingesetzten Beläge möglich.

Die Abbildung 2 und die Abbildung 5 zeigen die Belegung der Abschnitte mit den unterschiedlichen Belagstypen und deren Modifizierungen. So wurden in Bern dichte Beläge des Typs AC 11, SMA 8 und AC 8 eingebaut. Um die Anwendung auf lärmarmen Belägen (porös) zu testen, wurden SDA 4 und SDA 8 Beläge eingebaut. Abbildung 5 zeigt ebenfalls einen Typus SDA 5, welcher nachfolgend als SDA 4 bezeichnet wird, der aber leicht von der Norm abweicht. Für die dichten Beläge (AC 11, SMA 8 und AC 8) dient der unbehandelte AC 11 als Referenz und analog dazu dient der SDA 4 als Referenz für die porösen Beläge.

3.1 Standort Bern

Der Standort Bern an der Neuen Murtenstrasse liegt am nordwestlichen Ende der Stadt zwischen Autobahn und dem Grossen Bremgartenwald. Ein rund 120 Meter langer Abschnitt wurde dem Forschungsprojekt durch den Kanton Bern zur Verfügung gestellt.

AC 11 S, 40 mm (CP-1/2/11)			SMA 8, 35 mm (CP-5A/B/C)		
SDA 4-16 (CP-12)	SDA 5-16 hell, 40 mm (CP-8A/B/C)			SDA 8 hell (CP-7)	AC 8 farb (CP-6)
unbehandelt (CP-11)	Farbe 1 (CP-1) RAL 102 Sandgelb	Farbe 2 (CP-2) RAL 7035 Lichtgrau	Abstreuung 1 (CP-5A) 650 g/m ² 2/5 weiss	Abstreuung 2 (CP-5B) 1100 g/m ² 5/8 weiss	Abstreuung 3 (CP-5C) 700 g/m ² 5/8 weiss
unbehandelt (CP-12)	unbehandelt (CP-8C)	geschliffen (CP-8B)	w-gestrahlt (CP-8A)	w-gestrahlt (CP-7)	Farbe 3 (CP-6)

Abbildung 2: Belegung der Teststrecke mit unterschiedlichen Belagssorten und Oberflächenbehandlungen in Bern

Kernstück der Untersuchten Strecke sind die 12 eingebauten Teilabschnitte mit unterschiedlichen Grundbelägen und unterschiedlichen Modifizierungen für kühlende Eigenschaften. Abbildung 2 zeigt die unterschiedlichen Belagssorten, welche eingebaut wurden (oberer Teil) und deren spezifische Nachbehandlung (unterer Teil).



Abbildung 3: Standort Neue Murtenstrasse Bern (gekennzeichnet) und Luftaufnahme der eingebauten Belagsabschnitte
(Quelle: eigene Darstellung, Google Maps)

3.1.1 Belagstypen Bern

In Bern wurden einerseits AC 11 Beläge, sowie SMA 8 und SDA 4 eingebaut. Jede Belagssorte wurde danach entweder mit Farbe behandelt, geschliffen, wassergestrahlt oder mittels Abstreuerung «erhellte», um die reflektierende und somit «kühlende» Wirkung zu erzielen. Für jede Belagssorte wurde ein Referenzabschnitt mit unbehandelter Oberfläche eingebaut (CP-11 und CP-12 in Abbildung 2). Dabei handelt es sich um einen AC 11 (gilt auch als Referenz für SMA 8) und um einen SDA 4-16 als Referenzen für dichte und poröse Belagssorten der Testabschnitte. Alle Messungen werden jeweils mit denjenigen der Referenzbeläge verglichen, um ein genaueres Bild des Wärmepotenzials zu erhalten.

3.2 Standort Sion

Der Standort in Sion liegt auf der Rue de la Dixence im Südosten der Stadt. Der Strassenabschnitt liegt in einer Industriezone mit wenigen einzelnen Wohnhäusern. Ein rund 120 Meter langer Abschnitt wurde dem Projekt zur Verfügung gestellt. Der Abschnitt hat eine Ausrichtung Nordwest-Südwest. Der Schattenwurf spielt hierbei keine gewichtige Rolle, da sich keine hohen Gebäude unmittelbar daneben befinden.



Abbildung 4: Standort Rue de la Dixence, Sion (Quelle: eigene Darstellung, Google Maps)

3.2.1 Belagstypen Sion

Auf dem Abschnitt in Sion wurden zwei unterschiedliche Belagssorten eingebaut. Einerseits die Kombination SDA 4 – SDA 5 und SMA 8. Die Belagssorten wurden mit unterschiedlichen Farbanteilen eingebaut (SDA 5 50 % hell oder SDA 5 100 % hell, beide unbehandelt, CP-21 und CP-24 in Abbildung 5) mit unterschiedlichen Anteilen an weissem oder gelbem Schotter abgestreut (CP-26 bis CP-29) oder nachträglich geschliffen (CP-22 und CP-23). Zwei Referenzbeläge wurden nach Norm eingebaut und so belassen (CP-25 und CP-30).

CP-SDA 5 50% clair		CP-SDA 5 100% clair		SDA 4-12, référence nouvelle
SMA 8, gravioné 2/5			SMA 8, gravioné 5/8	SMA 8, référence (non-gravioné)
Aucun (CP-21)	ponçage (CP-22)	ponçage (CP-23)	aucun (CP-24)	non traité (CP-25)
gravioné, jaune (CP-26) env. 750g/m ²	gravioné, blanc (CP-27) env. 750g/m ²	gravioné, blanc (CP-28) env. 600g/m ²	gravioné, jaune (CP-29) env. 900g/m ² , jaune	non traité (CP-30)

Abbildung 5: Belegung der Teststrecke mit unterschiedlichen Belagssorten und Oberflächenbehandlungen in Sion

3.3 Die Meteorologie im Sommer 2020 in der Schweiz

Der Sommer 2020 gehört mit knapp 1 °C über der Norm von 1981-2010 zu den sehr warmen Sommern in der Schweiz. Nach einem Sommerbeginn mit durchschnittlichen Temperaturen wurde Ende Juli und in der ersten Augushälfte die grösste Hitze erreicht.

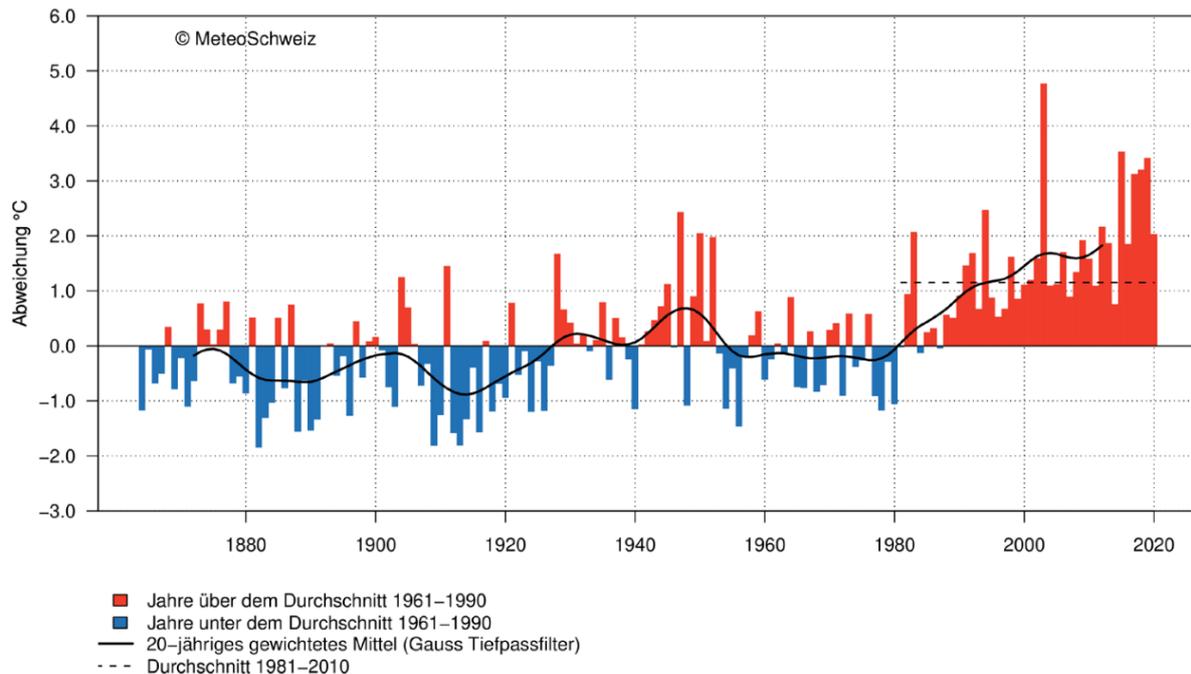


Abbildung 6: Abweichung der Sommertemperatur vom langjährigen Durchschnitt (1961-1990) in der Schweiz.

Quelle: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (2020)

- Der Juni 2020 erreichte ein landesweites Mittel von 11.8 °C und lag damit genau bei der Norm 1981–2010. Von Genf über das Wallis bis zur Alpensüdseite wurden im Juni an den MeteoSchweiz-Messstandorten 1 bis 3 Hitzetage aufgezeichnet, was etwa der Norm 1981–2010 entspricht.
- Im Juli blieb die Sommerwärme bei anhaltend wechselhafter Witterung vorerst mässig. Hitzetage gab es bis gegen Monatsende nur wenige (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, 2020). Eine längere Periode mit ausgeprägter Sommerhitze stellte sich erst in den letzten Julitagen ein, und auf der Alpensüdseite begann am 28. Juli die erste längere Hitzewelle des Sommers. Sie dauerte bis am 2. August. Im landesweiten Mittel erreichte der Juli 15.4 °C. Er lag damit 1.2 °C über der Norm 1981–2010.
- Der August startete mit einer sehr heissen Periode mit Tageshöchstwerten im Norden über 34 °C, im Süden knapp unter 34 °C. Heiss blieb es im Süden auch am 2. August. Anschliessend folgten beidseits der Alpen einige ausgesprochen kühle Tage. Auf der Alpensüdseite setzte ab dem 6. August die zweite, auf der Alpennordseite ab dem 7. August die erste längere Hitzewelle ein. Die Periode mit täglichen Höchstwerten von 30 °C und mehr dauerte je nach Region sechs bis sieben Tage. Die Temperaturspitzen stiegen beidseits der Alpen meist auf 32 bis 33 °C, lokal auch über 34 °C. Zwei weitere landesweite Hitzetage folgten am 20. und 21. August. Auf der Alpensüdseite hielt sich die Hitze bis am 23. August. Im landesweiten Mittel erreichte der August 15.2 °C und lag somit 1.4 °C über der Norm 1981–2010. Damit gehört er zu den sehr warmen Augustmonaten. Massiv wärmer mit knapp

Pilotprogramm Anpassung an den Klimawandel
Mit kühlen Strassenbelägen den Effekt von Hitzeinseln reduzieren
30. März 2021

18 °C zeigte sich nur der Rekord August 2003 (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie
MeteoSchweiz, 2020).

4. Messmethoden und Datenaufbereitung

Um die Wärmeentwicklung an der Oberfläche und innerhalb des Belags zu messen und aufzuzeichnen, wurden die Testabschnitte mit Infrarotkameras und Temperatursensoren ausgerüstet. Des Weiteren wurden an den Teststandorten die Wetterdaten aufgezeichnet. An jedem Standort wurden ausserdem periodisch Albedo Messungen vorgenommen sowie CPX Messungen (*Close-Proximity Messungen* zur Bestimmung der akustischen Eigenschaft des Belags, siehe Abschnitt 4.4 auf Seite 17) getätigt. Abbildung 7 zeigt schematisch den Messaufbau an den beiden Standorten².

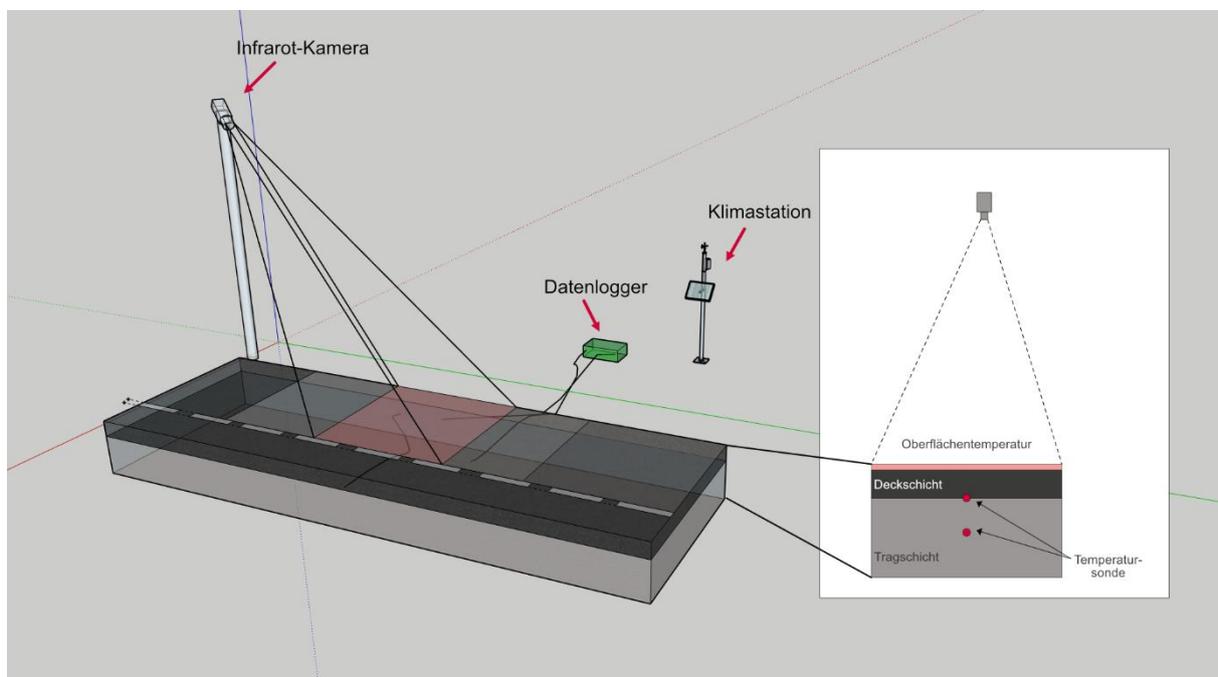


Abbildung 7: Schematischer Messaufbau an den Standorten Bern und Sion.

Die beiden Standorte wurden ausserdem mit einer Klimastation ausgerüstet, welche Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Windstärke und Windrichtung sowie die Feuchte aufzeichnet. Die Infrarotkameras, sowie die Temperatursonden im Belag wurden so programmiert, dass sie alle fünf Minuten mindestens eine Messung aufnehmen. Bei der Infrarotkamera wurden jeweils fünf Bilder in Serie aufgenommen, um zu verhindern, dass sich während der Aufnahme Fahrzeuge auf der Belagsoberfläche befinden.

² Entgegen der schematischen Darstellung befinden sich die Positionen der Temperatursonden im Belag aus messtechnischen Gründen nicht am selben Ort des Belagsabschnittes wie der Messbereich der Infrarot-Kamera. Aufgrund der Homogenität der Belagsabschnitte und der grossräumigeren, gemittelten Betrachtung der Messwerte sind beide Parameter trotzdem repräsentativ und vergleichbar.

4.1 Infrarotkameras

Bei den Infrarotkameras handelt es sich um die *thermoIMAGER TIM 8* und *TIM 40* von Micro-Epsilon³. Die Infrarotkameras der TIM-Serie sind zur berührungslosen Messung von Oberflächentemperaturen von -20 °C bis 2450 °C konzipiert. Die Infrarotkameras wurden an die Lampenmasten montiert und der Bildwinkel wurde auf die Verbindungsstelle zwischen den Belägen gerichtet. Dabei wurden in der Pixelmatrix der Aufzeichnung diejenigen Stellen definiert, welche mit Bestimmtheit einem Belagstyp zugeordnet werden können. Aus den Aufzeichnungen konnten danach mittels R-Skript alle fünf Minuten die gemittelten Temperaturdaten entnommen werden.

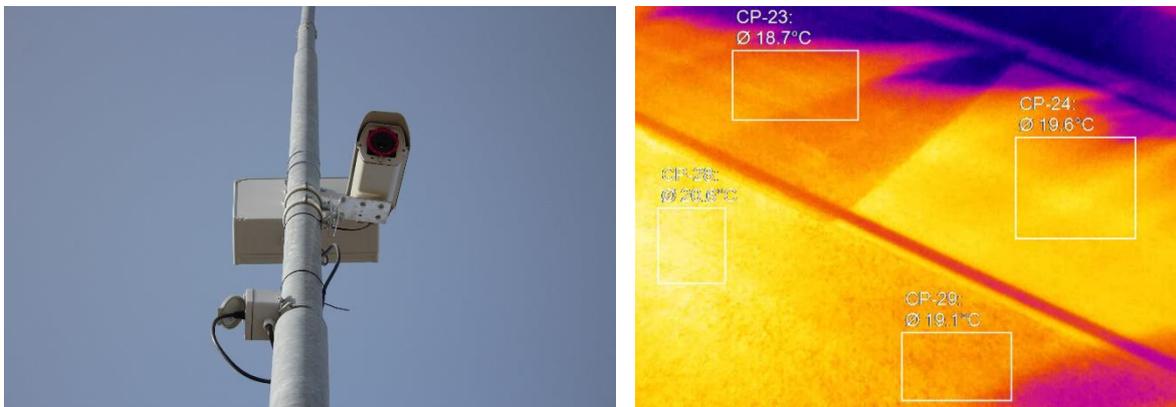


Abbildung 8: Montage Infrarotkamera und Blickwinkel Infrarotbild der TIM 40 Kamera

4.2 Temperatursonden im Belag

Bei den Temperatursonden handelt es sich um handelsübliche Temperatursensoren des Typs K, welche mit einem Datenlogger des Typs *MSR145* von MSR Electronics GmbH gekoppelt werden. Die Sensoren wurden im Belag verlegt und deren Enden wurden entweder auf die Tragschicht gelegt (~ 3 cm unter Oberfläche) oder aber in die Tragschicht versenkt (~ 7cm unter Oberfläche, siehe Abbildung 7 und Abbildung 9).

³ <https://www.micro-epsilon.de/download/products/cat--thermoIMAGER-TIM--de.pdf>



Abbildung 9: Temperatursonden (rechts) und Einbau der Sonde in den Strassenbelag (links)

4.3 Albedo Bestimmung durch Bildanalyse

Die Aufzeichnung der Albedo dient der Quantifizierung einer allfälligen Veränderung der reflektierenden Eigenschaften der Oberfläche. Das Verfahren wurde in diesem Projekt vereinfacht angewandt. So wurden zur Berechnung der Albedo auf den Testbelägen jeweils ein Foto des Belags mit den Referenzen «absorbierend» (schwarzes Papier, Albedo 0) und «reflektierend» (weisses Papier, Albedo 1) aufgenommen. Die Albedo des jeweiligen Testbelags wurde im Verhältnis zu den beiden Referenzen erhoben. Dabei wurde für jeden Teilbereich des Fotos ein Histogramm erstellt und daraus ein Helligkeitswert ermittelt.

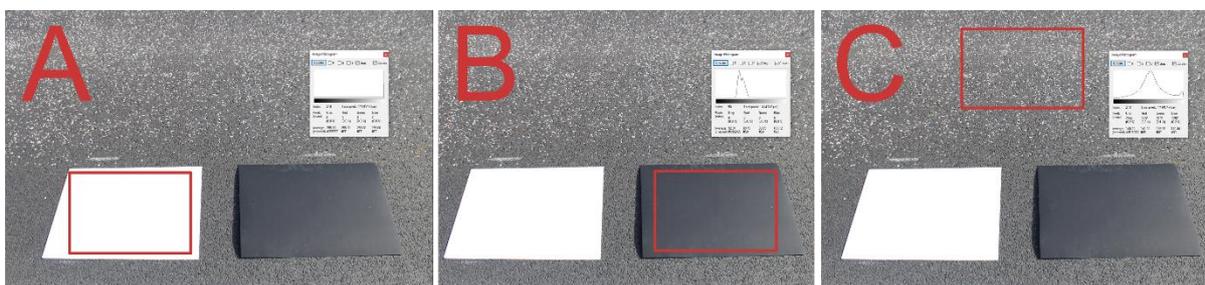


Abbildung 10: Histogramme der Bildpixel bei Messung im weissen Bereich (A), im schwarzen Bereich (B) und im Bereich des kühlenden Belags (C)

Abbildung 10 zeigt das Verfahren zur Berechnung der Albedo exemplarisch an einem Beispiel. So werden bei diesem Verfahren jeweils die Histogramme des weissen Blattes, des schwarzen Blattes sowie des Belags aufgezeichnet. In diesem Fall wurde die Software ImageJ⁴ verwendet. Für jeden Belagstyp

⁴ <https://imagej.nih.gov/ij/>

konnten somit drei Richtwerte aufgezeichnet werden, welche der Berechnung des Albedo Wertes dienen. Mittels der nachfolgenden Formel kann damit der Wert für einen Belag bestimmt werden.

$$A_B = \frac{W_p}{B_p} * 0.65$$

Mit:

W_p = weisses Papier

B_p = schwarzes Papier oder untersuchter Belagstyp

A_B = Albedo Wert Belag

Die Resultate wurden mit Forschungsergebnissen aus anderen Projekten abgeglichen, um die Plausibilität der Messwerte festzulegen. Resultate aus Sen & Roesler (2016), Coakley (2003) und Hashem Akbari et al. (2012) entsprechen in etwa den Albedo Messungen dieses Projekts. Die Resultate dienen als Möglichkeit zur Einordnung der Beständigkeit und der Effektivität der getesteten Beläge.

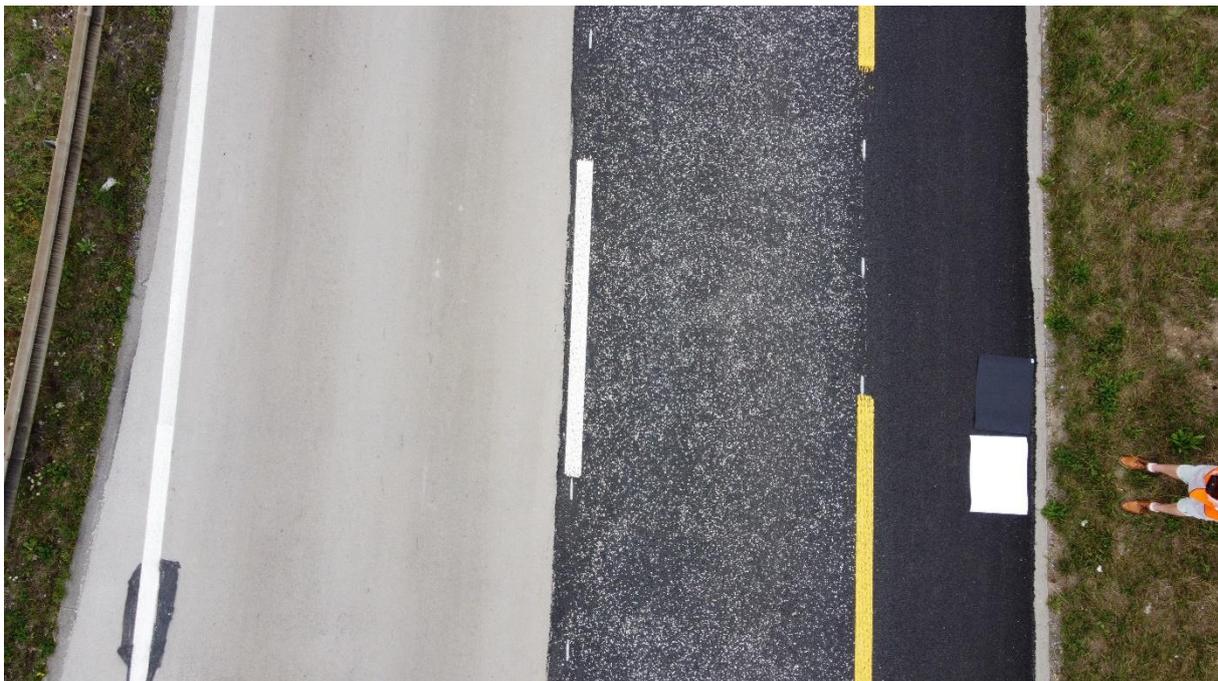


Abbildung 11: Drohnenbild mit weissem und schwarzem Papier zur Bestimmung der Albedo

4.4 CPX-Messungen

Mit der CPX-Methode nach EN ISO 11819-2:2017 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 12: CPX Messfahrzeug mit Anhänger zur direkten Messung der Reifen-Fahrbahngeräusche

Pro Reifen werden die A-bewerteten Schallpegel⁵ kontinuierlich erfasst und pro 20 Meter Segmente gemittelt. Die Messfahrt erfolgt bei konstanter Geschwindigkeit. Die erfassten Daten werden anschliessend für Geschwindigkeit, Temperatur, Gummi Härte und den Anhänger korrigiert und umgerechnet auf die Abweichung auf den in der Schweiz gültigen Emissionswert des Modells StL-86+.

4.5 Aufgezeichnete Daten

Die Sensoren wurden so programmiert, dass sie alle 5 Minuten einen Messwert aufzeichneten. Zur Vermeidung von Fehlmessungen bedingt durch vorbeifahrende Fahrzeuge wurden die Infrarotkameras so programmiert, dass sie alle 5 Minuten eine Serie von 5 Bildern aufnahmen. Fehlerhafte Daten wurden bei der Datenverarbeitung eliminiert. Gesamthaft wurden rund 2'800'000 Datenpunkte aufgezeichnet.

4.6 Auswertung der Daten

Die Daten aller Sensoren wurden in einem ersten Schritt bereinigt und fehlerhafte Aufzeichnungen wurden entfernt. Die Matrix der Infrarotbilder wurden nach Belagstyp aufgeteilt und daraus wurde ein Temperaturmittel generiert. Pro Infrarotbild konnten somit je vier Belagstemperaturen generiert werden. Dieses Temperaturdaten wurden mit Datum und Zeitstempel versehen und in eine Datenbank integriert, welche auch die Aufzeichnungen der Temperatursonden in den Belägen enthält. Die Werte wurden auf 5 Minuten Abschnitte und später auf 1 Stunde gemittelt. Es wurden zur Analyse nur Daten von Tagen mit Lufttemperatur > 30 °C für weitere Analysen genutzt.

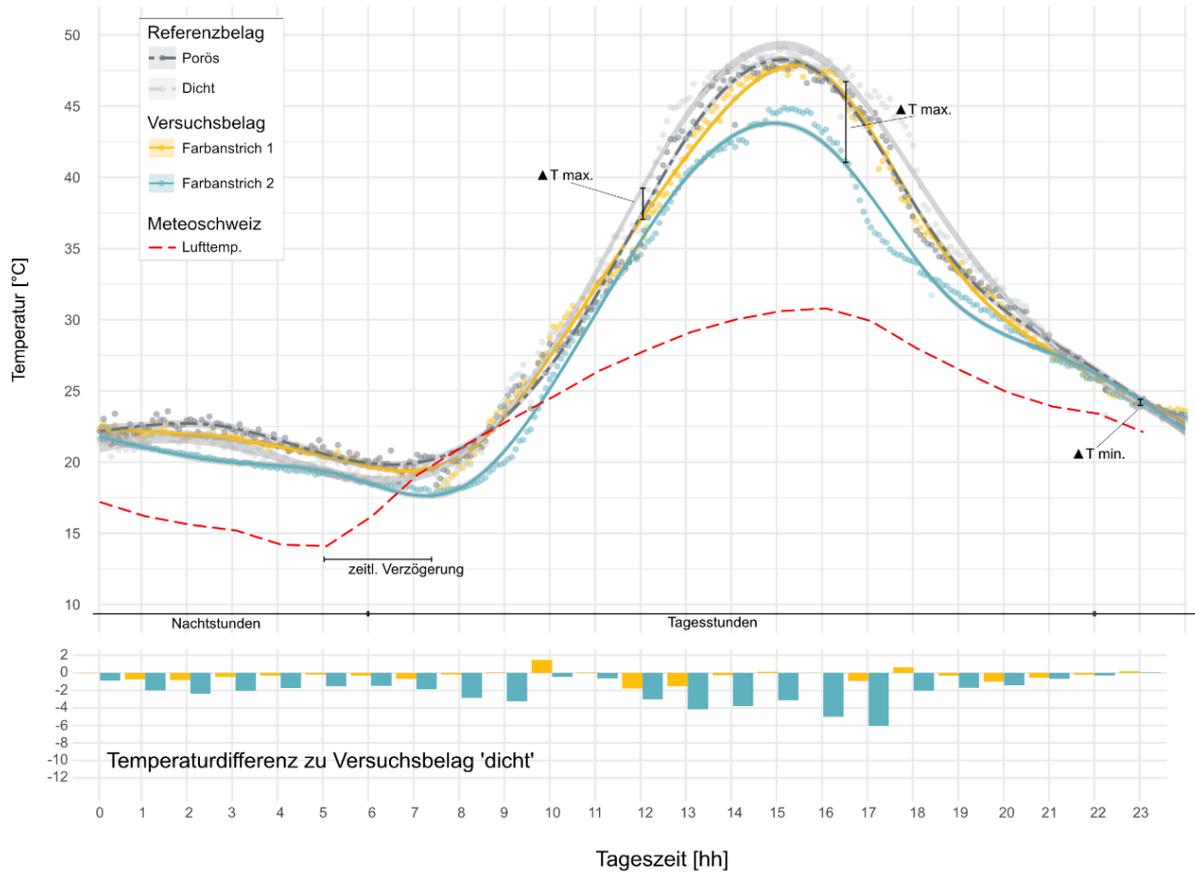
⁵ Die zurzeit gebräuchlichste Frequenzbewertung ist die A-Bewertung, wobei die Ergebnisse als dB(A) bezeichnet werden, was etwa der Empfindlichkeit des menschlichen Ohrs entspricht.

5. Resultate

Die Messungen an den beiden Standorten wurden in einem Zeitraum von Mitte Juni bis Ende September durchgeführt. Die Temperaturunterschiede werden immer im Vergleich zum Referenzbelag dicht oder porös in derselben Zeitspanne angegeben. Dabei gilt für dichte Testbeläge (Farbanstrich, Abstreuerung, Kornersatz) die dichte Referenz (AC 11 S) und für poröse Testbeläge (Kornersatz mit Oberflächenbehandlung) die poröse Referenz (SDA 4-16). Es handelt sich bei den dargestellten Grössen um die gemittelten Stundenwerte an Tagen mit einer Lufttemperatur von $>30\text{ °C}$ im Juli und August.

5.1 Beläge mit Farbanstrich

Bei Belägen mit Farbanstrich werden normierte Beläge eingebaut, welche in der Folge noch einen Farbanstrich erhalten. Dieser verändert die Oberflächenstruktur des Belags vollständig. Jedoch kann diese Technologie auf existierenden und intakten Infrastrukturen angewandt werden. In Bern wurden hierzu ein AC 11 Beläge eingebaut. Ein Abschnitt wurde mit einem sandgelben («Farbanstrich 1»), der andere mit einem hellgrauen Farbanstrich («Farbanstrich 2») versehen. Abbildung 13 zeigt, dass beide Beläge bis ca. 12 Uhr einen ähnlichen Temperaturverlauf an der Oberfläche aufweisen und sich der hellgraue Belag danach sehr viel weniger aufwärmt als die anderen Beläge. Am Zeitpunkt der maximalen Temperaturdifferenz (ΔT_{max}) um 17 Uhr wird der Unterschied zwischen dem gelben und dem hellgrauen Belag deutlich.



AC 11 S, 40 mm (CP-1/2/11)			SMA 8, 35 mm (CP-5A/B/C)		
SDA 4-16 (CP-12)	SDA 5-16 hell, 40 mm (CP-8A/B/C)		SDA 8 hell (CP-7)	AC 8 farb (CP-6)	
unbehandelt (CP-11)	Farbe 1 (CP-1) RAL 102 Sandgelb	Farbe 2 (CP-2) RAL 7035 Lichtgrau	Abstreuerung 1 (CP-5A) 650 g/m ² 2/5 weiss	Abstreuerung 2 (CP-5B) 1100 g/m ² 5/8 weiss	Abstreuerung 3 (CP-5C) 700 g/m ² 5/8 weiss
unbehandelt (CP-12)	unbehandelt (CP-8C)	geschliffen (CP-8B)	w-gestrahlt (CP-8A)	w-gestrahlt (CP-7)	Farbe 3 (CP-6)

Abbildung 13: Temperaturverlauf auf Belägen mit Farbanstrich und Übersicht auf Belegungsschema

Die Unterschiede der Farbbeläge zeigen sich auch in der Tabelle 1. So ist der maximale Unterschied zum Referenzbelag beim sandgelben Belag nur rund 1.7 °C, während der lichtgraue Belag einen maximalen Unterschied von 6 °C zeigt. Über 24 Stunden ergibt sich ein durchschnittlicher Temperaturunterschied von 0.4 °C für den sandgelben Belag und 1.5 °C für den lichtgrauen Belag. Die zeigt eine gewisse Effektivität für den lichtgrauen Belag, welche sehr viel ausgeprägter ist als beim sandgelben Belag.

Tabelle 1: Gemessene Temperaturunterschiede bei unterschiedlichen Farbanstrichen an Tagen mit Lufttemperatur > 30 °C. Angegeben sind Maximale Temperaturabweichung vom Referenzbelag und Durchschnittliche Abweichung über 24 Stunden.

	sandgelb	lichtgrau
Bild		
▲ T _{max} [°C]	-1.78	-6.03
∅ [°C]	-0.39	-1.51

Die Abbildung 14 zeigt die Temperaturentwicklung im sandgelben und lichtgrauen Belag in unterschiedlichen Tiefen. Dabei ist festzustellen, dass sich der lichtgraue Belag sehr viel weniger aufwärmt als der sandgelbe Belag, welcher einen analogen Tagesverlauf hat wie der Referenzbelag. Im selben Zeitraum bleibt der lichtgraue Belag unterhalb der Temperaturkurve des Referenzbelags. Diese Beobachtung deckt sich mit dem Ergebnis aus der IR-Messung zur Oberflächentemperatur wie oben erläutert. Der doch sehr deutlichen Unterschied im Wärmeverhalten der beiden Farbvarianten ist ein wichtiger Hinweis darauf, dass eine helle Erscheinung allein nicht ausreicht, um die Temperatur zu senken. Möglich ist, dass die gelbe Farbe, die hier verwendet wurde, in einem bestimmten Spektralbereich stark absorbierend ist und sich darum die Oberfläche und der darunterliegende Belag ähnlich einem dunklen Belag aufheizen.

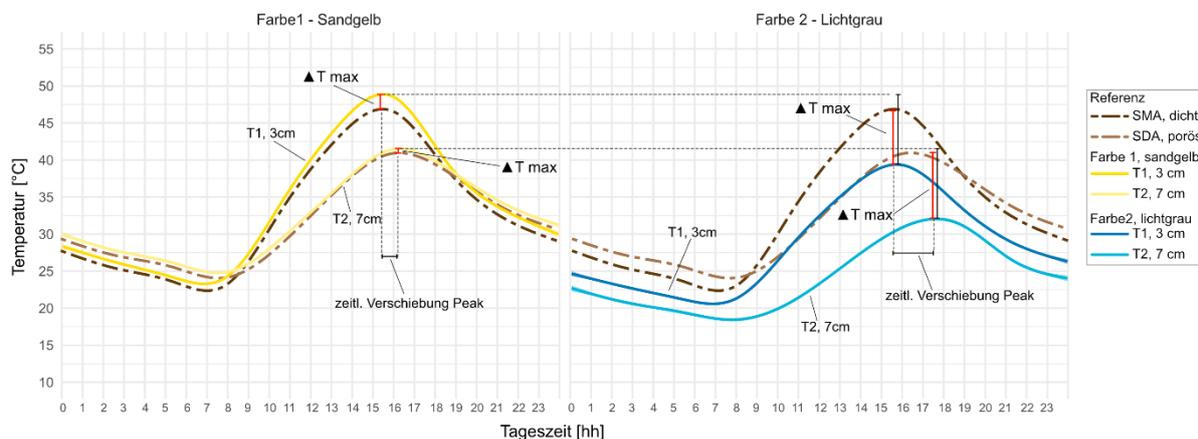


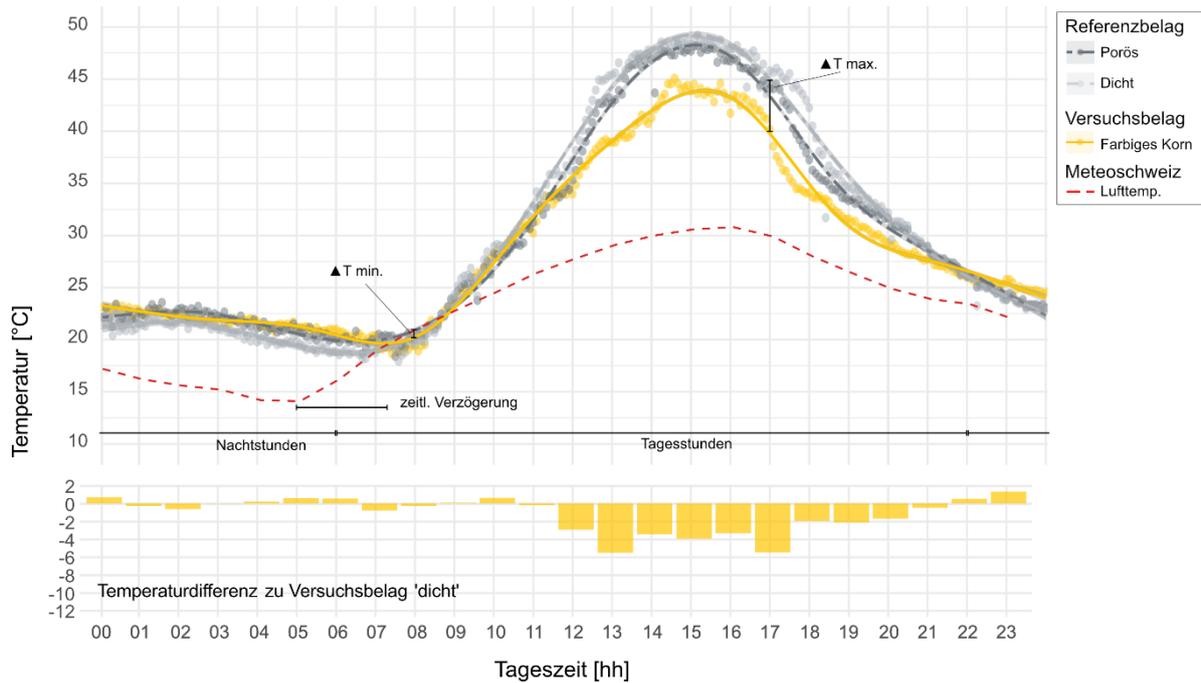
Abbildung 14: Belagtemperaturen Oberfläche und im Belag für die Farbbeläge sandgelb und lichtgrau

5.2 Farbbeläge

Bei diesem Anwendungstyp wird der Deckbelag mit farbigem (weiss, grau, rot) Gestein unter Verwendung von farblosem Bitumen, welches wahlweise zusätzlich mit Farbpigmenten versetzt wird, aufgebaut. Die Möglichkeiten für farbiges Korn sind dabei beschränkt und nicht jede Farbkombination ist möglich. Dieser Belagstyp findet in der Regel für spezielle Flächenmarkierungen und Platzgestaltungen mit architektonischen Elementen Verwendung.

Auf der Teststrecke in Bern wurde eine Mischung mit einer hellgrauen Erscheinung ähnlich wie Beton verwendet. Die Abbildung 15 zeigt den Tagesgang der Temperatur bei einem Belag mit farbigem Korn

an einem Tag mit Lufttemperatur > 30 °C. Bei diesem Belagstyp sind die Temperaturabweichungen im Zeitraum von 12 Uhr bis 20 Uhr signifikant. Die Abbildung zeigt eine Abweichung der Belagsoberflächentemperatur bei ΔT_{max} um 17 Uhr von rund 5.5 °C gegenüber Referenz AC 11 dicht. Bei diesem Belagstyp sind die Temperaturabweichungen im Zeitraum von 12 Uhr bis 20 Uhr deutlich.



AC 11 S, 40 mm (CP-1/2/11)			SMA 8, 35 mm (CP-5A/B/C)		
SDA 4-16 (CP-12)	SDA 5-16 hell, 40 mm (CP-8A/B/C)			SDA 8 hell (CP-7)	AC 8 farb (CP-6)
unbehandelt (CP-11)	Farbe 1 (CP-1) RAL 102 Sandgelb	Farbe 2 (CP-2) RAL 7035 Lichtgrau	Abstreuerung 1 (CP-5A) 650 g/m ² 2/5 weiss	Abstreuerung 2 (CP-5B) 1100 g/m ² 5/8 weiss	Abstreuerung 3 (CP-5C) 700 g/m ² 5/8 weiss
unbehandelt (CP-12)	unbehandelt (CP-8C)	geschliffen (CP-8B)	w-gestrahlt (CP-8A)	w-gestrahlt (CP-7)	Farbe 3 (CP-6)

Abbildung 15: Temperaturverlauf auf Belag mit farbigem Korn im Vergleich mit den Referenzbelägen und Übersicht auf Belegungsschema

Tabelle 2 zeigt den maximalen Temperaturunterschied (ΔT_{max}) sowie den gemittelten Temperaturunterschied über 24 Stunden ($\bar{\Delta T}$) auf der Belagsoberfläche. So wurde bei einem maximalen Temperaturunterschied von bis zu 5.5 °C eine mittlere Abweichung über die gesamten 24 Stunden von 2 °C im Schnitt ermittelt.

Tabelle 2: Gemessene Temperaturunterschiede bei unterschiedlichen Farbkörnern

	Farbbelag
Bild	
▲ Tmax [°C]	-5.5
∅ [°C]	-2

Abbildung 16 zeigt die Tagesverläufe der Temperatursonden im Belag in 3 und 7 cm Tiefe. Dabei ist ersichtlich, dass beide Kurven im Testbelag den jeweiligen Kurven im Referenzbelag (graue Kurven) folgen, die Sonde in der tiefen liegenden Schicht (7 cm, hellgelb) jedoch sehr viel weniger erwärmt wird als im Referenzbelag. Dies könnte ein Hinweis sein auf einen isolierenden Effekt der farbigen Deck-schicht bzw. einen reduzierten Wärmeaustausch mit der tieferliegenden Schicht.

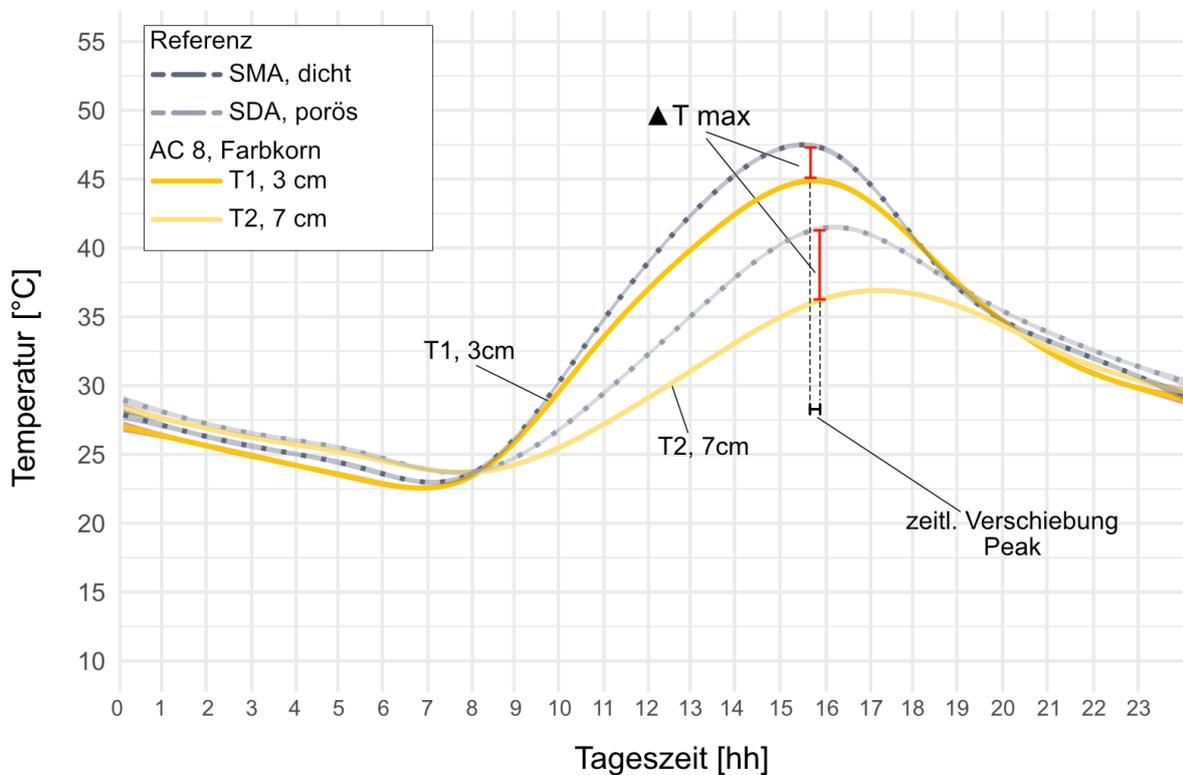
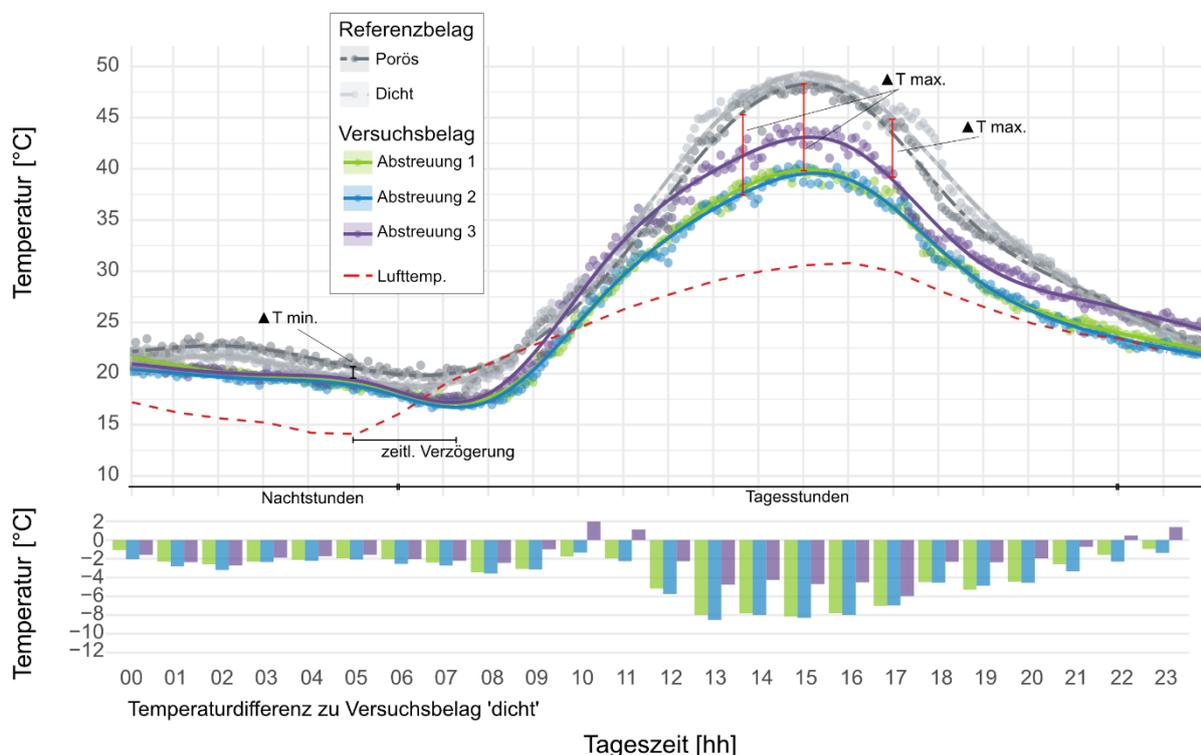


Abbildung 16: Temperaturverlauf in unterschiedlichen Tiefen für den Belag mit farbigem Korn

5.3 Beläge mit Abstreuerung

Bei der Abstreuerung wird der Belag nach Norm eingebaut aber im heissen Zustand direkt nach der Fertigungsmaschine werden zusätzliche helle Körner abgestreut und mit der Walze in die Oberfläche eingepresst. Dies ergibt auf ein helleres Erscheinungsbild, welches je nach Menge an abgestreutem Korn variiert. Zudem ergibt sich eine weitere Option mit der Vorumhüllung des Abstreuergranulats für bessere Haftung. Damit verbunden ist allerdings auch eine Farbverschiebung ins Gelbe. Diese Methode eignet sich bei einem Deckbelagersatz und kann als «low-cost» Variante eingestuft werden. Diese Methode eignet sich nicht in Kombination mit SDA Belägen für lärmarme Eigenschaften.

Der in diesem Projekt angewandte Fächer an Variationen bei der Abstreuerung ist in Tabelle 3 ersichtlich.



AC 11 S, 40 mm (CP-1/2/11)			SMA 8, 35 mm (CP-5A/B/C)		
SDA 4-16 (CP-12)	SDA 5-16 hell, 40 mm (CP-8A/B/C)			SDA 8 hell (CP-7)	AC 8 farb (CP-6)
unbehandelt (CP-11)	Farbe 1 (CP-1) RAL 102 Sandgelb	Farbe 2 (CP-2) RAL 7035 Lichtgrau	Abstreuerung 1 (CP-5A) 650 g/m ² 2/5 weiss	Abstreuerung 2 (CP-5B) 1100 g/m ² 5/8 weiss	Abstreuerung 3 (CP-5C) 700 g/m ² 5/8 weiss
unbehandelt (CP-12)	unbehandelt (CP-8C)	geschliffen (CP-8B)	w-gestrahlt (CP-8A)	w-gestrahlt (CP-7)	Farbe 3 (CP-6)

Abbildung 17: Temperaturverlauf bei Belägen mit verschiedenen Abstreuerungsgraden am Standort Bern. Dabei bezeichnet Abstreuerung 1 (analog zu Abbildung 2) den Belag mit 650 g/m², Abstreuerung 2 den Belag mit 1100 g/m² und Abstreuerung 3 den Belag mit 700 g/m².

Abbildung 17 zeigt die Tagesganglinien der drei Testbeläge in Bern, welche mit unterschiedlichen Mengen an hellem Korn abgestreut wurden. Abstreuerung 1 verweist auf den Belag mit 650 g/m²

feinerem 2/5er Splitt, Abstreuerung 2 auf 1100 g/m² und Abstreuerung 3 auf 700 g/m² jeweils größerem 5/8er Splitt. Die 3 Testbeläge haben ähnliche Temperaturverläufe bis Rund 7 Uhr morgens, danach bleiben die beiden Beläge Abstreuerung 1 und 2 rund 2-3 °C bis in die Nachtstunden tiefer als der Belag Abstreuerung 3.

Tabelle 3: Gemessene Temperaturunterschiede bei unterschiedlicher Abstreueungsvarianten an beiden Standorten.

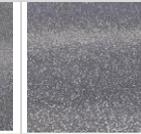
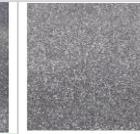
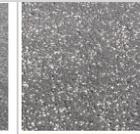
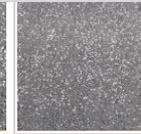
	Sion				Bern		
Bez.	750 g/m ² gelb	750 g/m ² weiss	600 g/m ² weiss	900 g/m ² gelb	650 g/m ²	1100 g/m ²	700 g/m ²
Bild							
▲ Tmax [°C]	-7.8	-8.2	-9.7	-11.1	-8.16	-8.5	-5.9
∅ [°C]	-2.2	-6.4	-6.6	-5.1	-4.5	-4.7	-2.6

Abbildung 17 und Tabelle 3 zeigen, dass mittels Abstreueung eine erhebliche Temperaturdifferenz an der Belagsoberfläche möglich ist. So wurden Unterschiede bei ΔT_{\max} von bis zu 11 °C und über 24 Stunden im Schnitt bis zu 6.6 °C erreicht. Es ist weiter zu beachten, dass der Belag mit der höchsten Temperaturdifferenz nicht demjenigen mit der höchsten Menge Abstreueung entspricht, sondern, dass tiefere Mengen von 600 bis 900 g/m² die besten Resultate zeigen. Auf den ersten Blick ist auch kein spezielles Muster in Bezug auf die Variation der Korngrösse bzw. des Farbtons ersichtlich. Dabei muss allerdings auch erwähnt werden, dass die hier genannten Mengenangaben dem Soll gemäss Versuchsplanung entsprechen. Für die effektiven Mengen ist aufgrund der manuellen Applikation und möglichen Ausbrüchen während den ersten Wochen unter Verkehr mit allfälligen Differenzen zu rechnen.

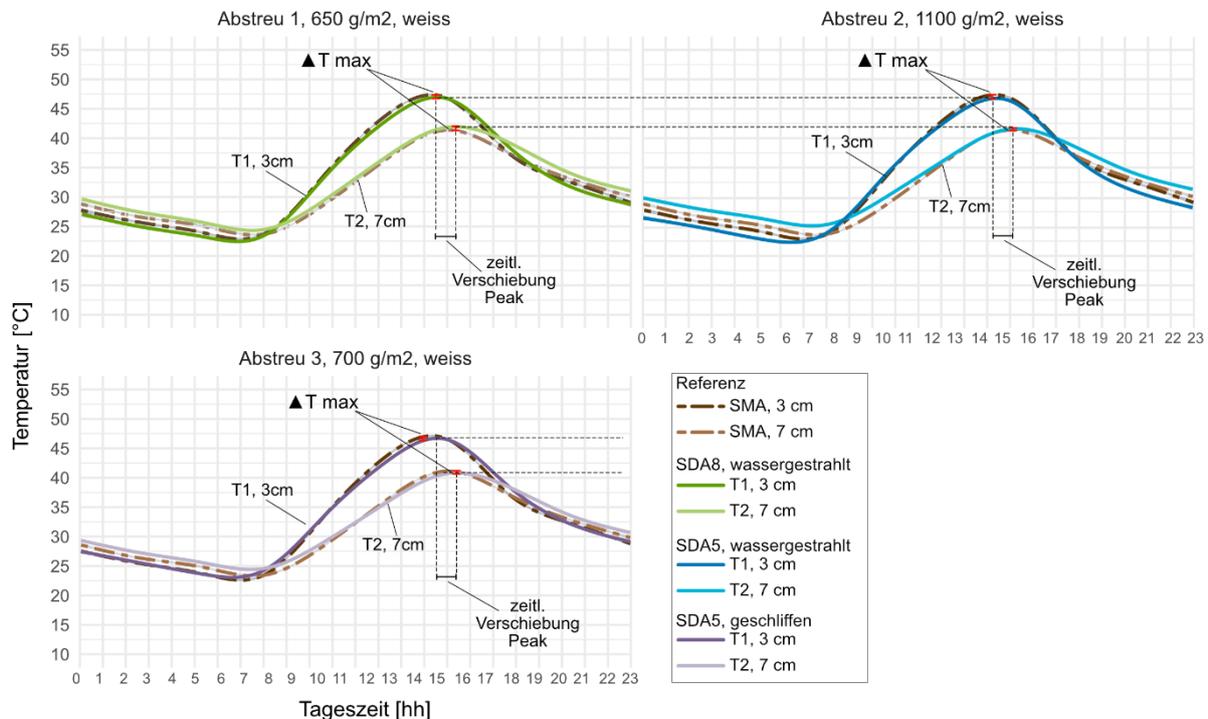


Abbildung 18: Belagstemperaturen in 3-4 (T1) und 7-10 cm (T2) Tiefe für die Beläge mit Abstreuerung (nur Auswahl).

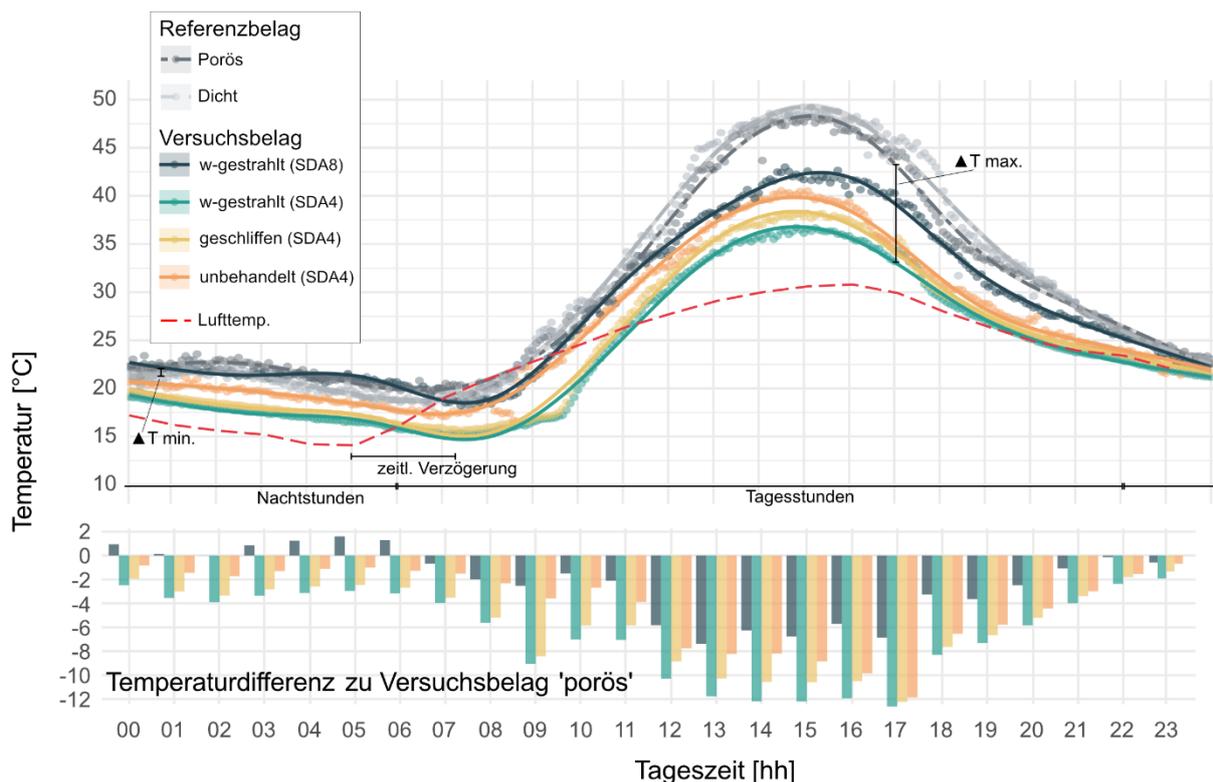
Abbildung 18 zeigt den Temperaturverlauf der im Testbelag eingebauten Sonden an Tagen mit Lufttemperatur > 30 °C. Die Tagesverläufe der drei Testbeläge sind nur minimal unterschiedlich und folgen allesamt demselben Muster. So wärmen sich die oberflächennahen Schichten ab 8 Uhr morgens stärker auf, um dann ab 17 Uhr viel stärker auszukühlen und wieder unter die Temperatur der tieferliegenden Schicht zu fallen. Dieser Effekt ist bei Abstreueung 2 mit 1100 g/m² am ausgeprägtesten, was mit der grössten gemessenen Temperaturdifferenz an der Oberfläche für die Beläge in Bern gemäss Tabelle 3 konsistent ist.

5.4 Beläge mit Kornersatz

Beim Kornersatz wird auf Basis der Standard-Rezeptur ein Teil der Körnung mit sehr hellem oder weissem Gestein ersetzt und das Mischgut mit regulärem Bitumen schwarz angemischt und eingebaut. Nach Einbau erfolgt zusätzlich eine Oberflächenbehandlung wie Schleifen oder Wasserstrahlen, um den kühlenden Effekt der hellen Körnung sofort zu aktivieren. Alternativ kann auch die Abnutzung und Abwitterung des Bitumens an der Oberfläche über einen typischen Zeitraum von 1-2 Jahren abgewartet werden. Diese Methode eignet sich für einen Deckbelagsersatz sowohl für dichte wie auch für hohlräumreiche Beläge wie der SDA für Anwendungen die lärmarme Eigenschaften erfordern.

Bei den Testbelägen, welche in Bern zur Anwendung kamen, handelt es sich um einen SDA 8 wassergestrahlt, sowie um drei spezielle SDA 5 Beläge, welche einmal wassergestrahlt, einmal geschliffen und einmal unbehandelt gelassen wurden (siehe Abbildung 2, Seite 9). Als Referenz dieser Gruppe

dient ein SDA 4 Belag ohne Oberflächenbehandlung, wie er typischerweise als lärmärmer Belag eingesetzt wird.



AC 11 S, 40 mm (CP-1/2/11)		SMA 8, 35 mm (CP-5A/B/C)			
SDA 4-16 (CP-12)	SDA 5-16 hell, 40 mm (CP-8A/B/C)			SDA 8 hell (CP-7)	AC 8 farb (CP-6)
unbehandelt (CP-11)	Farbe 1 (CP-1) RAL 102 Sandgelb	Farbe 2 (CP-2) RAL 7035 Lichtgrau	Abstreuerung 1 (CP-5A) 650 g/m ² 2/5 weiss	Abstreuerung 2 (CP-5B) 1100 g/m ² 5/8 weiss	Abstreuerung 3 (CP-5C) 700 g/m ² 5/8 weiss
unbehandelt (CP-12)	unbehandelt (CP-8C)	geschliffen (CP-8B)	w-gestrahlt (CP-8A)	w-gestrahlt (CP-7)	Farbe 3 (CP-6)

Abbildung 19: Temperaturverlauf der Testbeläge in Bern mit Kornersatz und unterschiedlicher Nachbehandlung (Wasserstrahlung vs. Schliff).

Wie in Abbildung 19 ersichtlich, zeigt diese Methode die unter anderem besten Resultate für den kühlenden Effekt. Die Kombination von poröser Struktur und hellem Gestein ergibt einen maximalen Temperaturunterschied von bis zu 12.6 °C, gemessen um 17 Uhr beim wassergestrahlenen SDA 5 Belag. Dabei ist beim SDA 5 kaum ein Unterschied festzustellen in Bezug auf die Behandlungsmethode wassergestrahlt oder geschliffen. Entgegen den Erwartungen zeigt auch der unbehandelte SDA 4 Belag einen bereits beachtlichen kühlenden Effekt in kurzer Zeit nach dem Einbau, welcher den des wassergestrahlenen SDA 8 sogar übertrifft. Der unbehandelte Belag hingegen zeigt geringere Effekte (vor allem im Tagesmittel sind deutliche Unterschiede sichtbar, siehe Tabelle 4). Der wassergestrahlte SDA 8 Belag zeigt deutlich kleinere Effekte als die SDA 4 Beläge. Dies ist möglicherweise auf den Korngrössenunterschied von 8 und 4 mm zurückzuführen.

Analog zu den Resultaten von Stempihar et al. (2012) zeigen poröse Beläge auch in tieferen Schichten eine etwas grössere kühlende Wirkung als dichte Beläge (vgl. Abbildung 18 mit Abbildung 20). Dies dürfte auf die zusätzlichen Hohlräume bei diesem Typus von Belag zurückzuführen sein, welche eine zusätzliche kühlende Wirkung aufweist. Eine zusätzliche kühlende Wirkung entsteht bei Niederschlägen, da porösen Belägen wegen der Hohlräume zusätzlich Wasser aufnehmen und dadurch ein Effekt über die Verdunstung entsteht.

Tabelle 4: Gemessene Temperaturunterschiede bei unterschiedlicher Varianten von Kornersatz

	Sion				Bern			
Title	SDA4 50% unbehandelt	SDA4 50% geschliffen	SDA4 100% geschliffen	SDA4 100% unbehandelt	SDA4 unbe- handelt	SDA4 geschliffen	SDA4 wasser- gestrahlt	SDA8 wasser- gestrahlt
Bild								
▲ Tmax	-4.8	-11.3	-12.1	-9.8	-11.9	-12.2	-12.6	-7.4
∅	-2.2	-6.4	-6.7	-5.1	-3.5	-7.9	-7	-5.4

Tabelle 4 fasst das Resultat der Oberflächentemperaturmessung für Beläge mit Kornersatz auf den beiden Teststrecken in Bern und Sion zusammen. Interessanterweise ist kein grosser Unterschied in der Effektivität bei ΔT_{max} beim Belag mit 50% reduziertem Kornersatzanteil zu sehen. So zeigen die beiden geschliffenen Beläge SDA 5 50% und SDA 5 100% lediglich einen ΔT_{max} Unterschied von 1 °C und im entsprechenden Tagesmittel nur 0.3 °C Differenz. Wie bereits auch schon das Resultat der Abstreuerung deutet dies darauf hin, dass ein teilweise-Kornersatz mit Oberflächenbehandlung bereits ausreichend ist, um einen grossen Effekt hervorzurufen. Das ist eine wichtige Erkenntnis, da sich die Menge an verwendetem hellem Gestein direkt auf die Mehrkosten auswirkt.

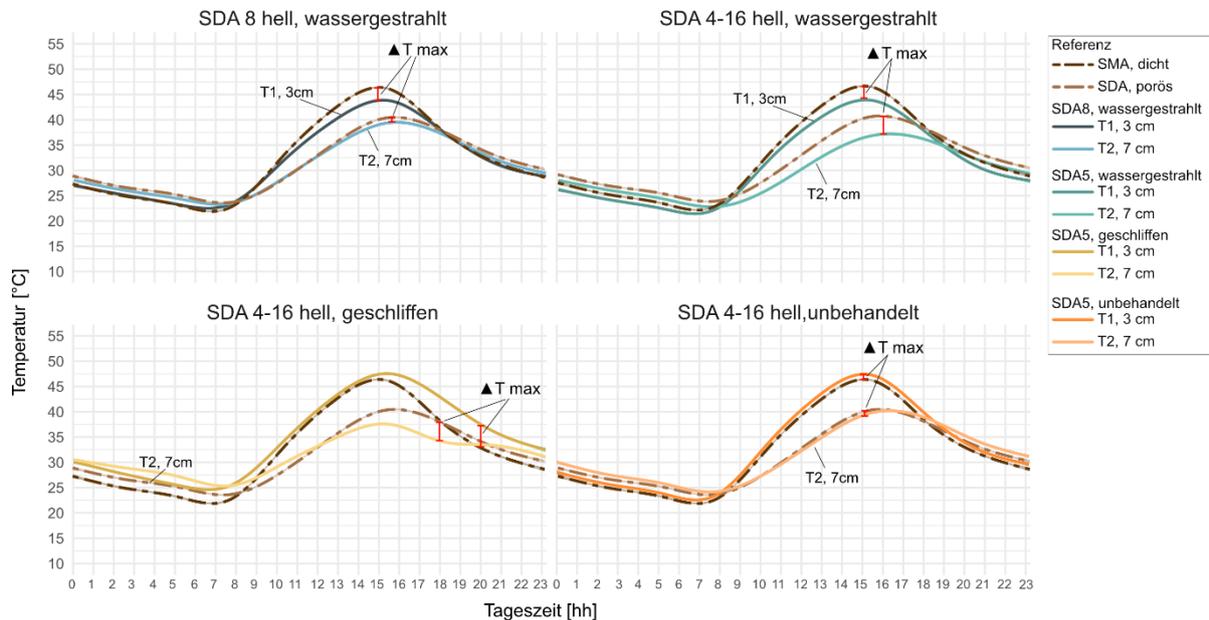


Abbildung 20: Belagstemperaturen in 3-4 (T1) und 7-10 cm (T2) Tiefe für die Beläge mit Kornersatz.

Abbildung 20 zeigt den Tagesverlauf der Temperaturen in den unterschiedlichen Belägen. Die Unterschiede zeigen sich deutlich bei den Sonden in den tieferen Belagsschichten. So ist zu sehen, dass bei den Beläge SDA 4-16 geschliffen (unten links) und wassergestrahlt (oben rechts), die Wärmeleitung in die tiefere Schicht sehr viel weniger stattfindet als beispielsweise im Belag SDA 5-16 unbehandelt (unten rechts). Der ähnliche Temperaturverlauf der tieferen Schicht im SDA8 Belag dürfte trotz Wasserstrahlung wiederum auf die Korngrößenunterschiede zurückzuführen sein.

5.5 Weitere relevante Aspekte der kühlenden Beläge

Die Testbeläge wurden mit zwei weiteren Messverfahren einerseits auf ihre lärmarmen Eigenschaften (mittels CPX-Messung) sowie auf ihre kurzfristige Beständigkeit der Oberflächenhelligkeit (Albedo-Messung) geprüft. Diese zwei zusätzlichen Größen sind zwar für den Aspekt der kühlenden Wirkung nicht primär relevant, sind aber im Kontext der urbanen Anwendung (Lärm) und der bautechnischen Anwendung (Beständigkeit) genauso wichtig. Ziel dabei ist es festzuhalten ob die Beläge sich bautechnische hinsichtlich des Zustands schneller abnutzen als herkömmliche Beläge und ob die Bauweise einen Einfluss auf die lärmarmen Eigenschaften hat.

5.5.1 Albedo

Die Berechnung der Albedo Werte zu verschiedenen Zeitpunkten gibt Aufschluss über allfällige Veränderungen an der Oberfläche der unterschiedlichen Belagstypen. So lässt sich mittels der Albedo eine Verminderung der Reflexion festhalten, was indirekt Aufschluss geben kann über die kühlende Wirkung des Belags. So wäre bei einer starken Abnahme der Oberflächenalbedo zwischen zwei Messzeitpunkten ebenfalls eine Abnahme der kühlenden Wirkung zu erwarten.

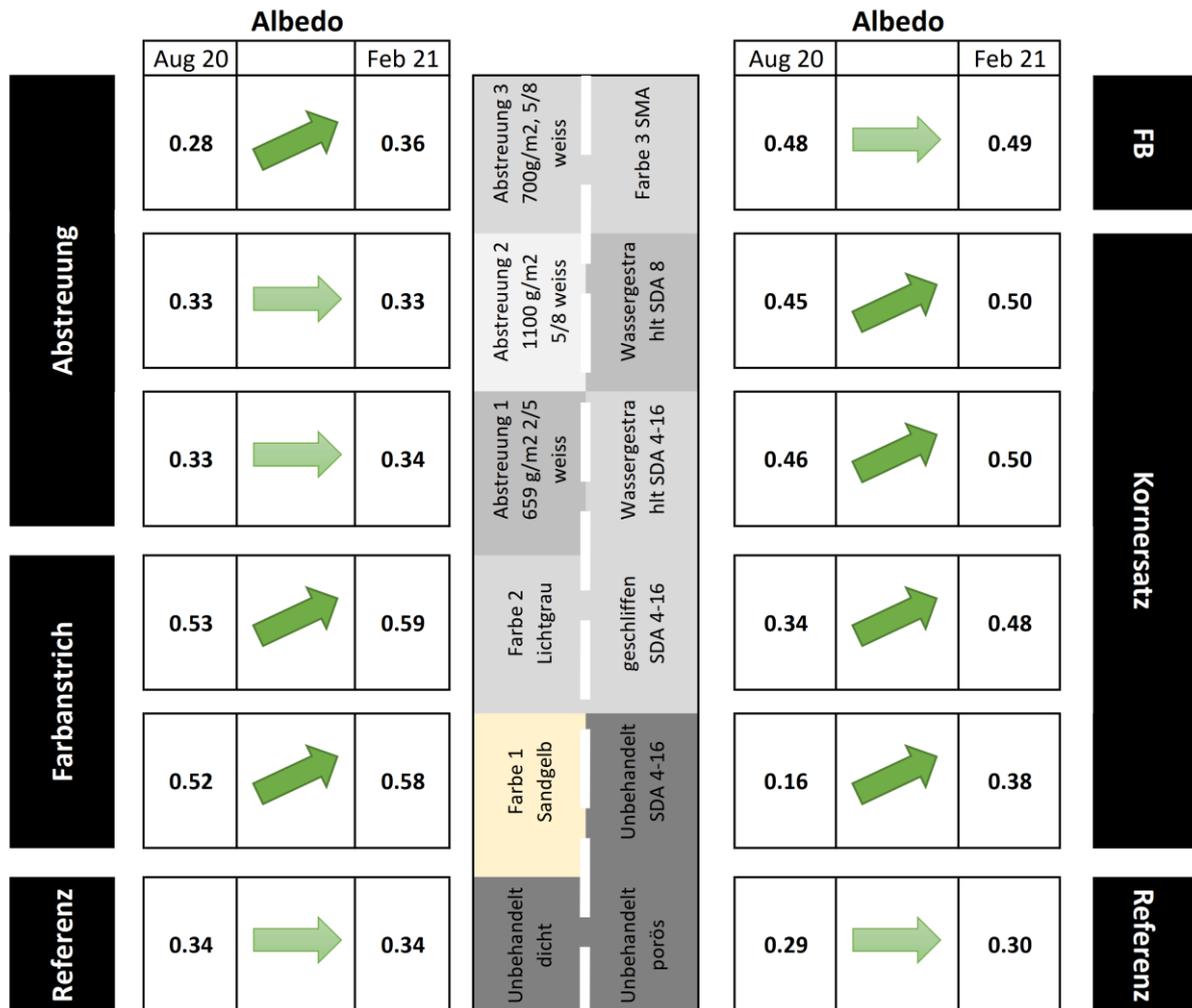


Abbildung 21: Zusammenstellung der berechneten Albedo Werte pro Testbelag im August 2020 sowie im Februar 2021.

Die Untersuchung zeigt, dass sich die Temperaturmessungen mittels Infrarotkamera an der Oberfläche mit den Resultaten der Albedo Werte decken und dass die unterschiedlichen Testbeläge Albedo Werte aufweisen, wie sie physikalisch zu erwarten sind (dunkle Beläge tiefe Albedo, helle Beläge hohe Albedo, siehe Abbildung 21). Referenzbeläge ohne Behandlung weisen deutlich tiefere Albedo Werte (absorbierende Eigenschaft) auf als die Testbeläge allgemein.

Die beiden Beläge mit Farbanstrich weisen dabei die höchsten Albedo Werte auf, welche sich im Verlauf der Zeit zwischen August 2020 und Februar 2021 noch erhöht haben. Innerhalb der Testbeläge mit Kornersatz ist eine deutliche Erhöhung der Albedo Werte von August 2020 bis Februar 2021 festzustellen (Δ_{\max} : 22 bei unbehandeltem Abschnitt), welche sich auf eine Freilegung des hellen Korns zurückführen lässt.

Die Messungen geben auch Aufschluss über die Beständigkeit der Belagstechnik, welche sich indirekt über die Reflexion darstellen würde. So ist bei allen Testbelägen eine moderate bis deutliche Erhöhung der Albedo Werte festzustellen, während bei den Referenzbelägen keine oder nur eine minimale Aufhellung stattgefunden hat.

5.5.2 CPX

Da kühlende Technologien mehrheitlich in urbanem Gebiet zur Anwendung kommen, stellt sich die Frage nach der akustischen Belagsgüte. Aus diesem Grunde wurde in diesem Projekt auch die Anwendung von kühlenden Belägen auf lärmarmen Mischungen getestet. Um die Güte der Beläge hinsichtlich des Lärms zu evaluieren, wurde auf die bewährte CPX Messmethode zurückgegriffen.

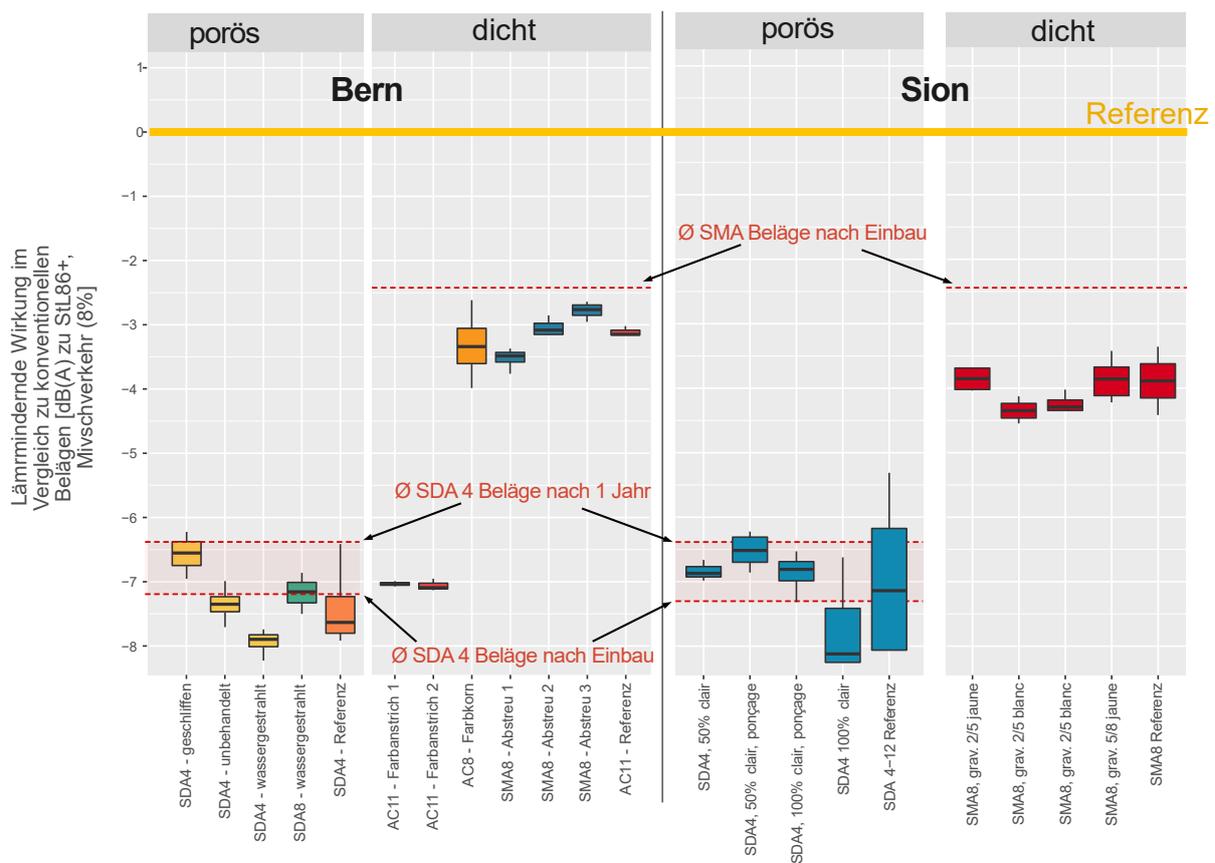


Abbildung 22: Resultate der CPX Messungen auf den Belägen in Bern und Sion. Die roten Linien zeigen die durchschnittlichen Messwerte vergleichbarer Beläge. Da die Beläge nicht sofort nach Einbau gemessen wurden, sind bei den lärmarmen Belägen auch die Durchschnittswerte nach 1 Jahr angegeben.

Wie Abbildung 22 zeigt, ist die Lärmreduktion sowohl der porösen wie auch der dichten Beläge in den zu erwartenden Bereichen angesiedelt. Alle Beläge entsprechen den langjährigen Messwerten im Neuzustand. Einzige Ausnahme bilden die AC11 Beläge mit Farbanstrich, welche einen viel besseren Wert erzielen als bei vergleichbaren Belägen zu erwarten wäre. So bewegen sich die beiden Beläge mit Farbanstrich bei -7 dB(A) – vergleichbare Belagstypen sind im Schnitt nur -2.4 dB(A) leiser als die Referenz. Einzige Erklärung hierfür ist, dass der Farbanstrich eine lärmindernde Wirkung auf den ansonsten normgerechten AC11 Belag hat. Diesen bautechnischen Aspekt gilt es weiterzuverfolgen, da eine zukünftige Veränderung nicht ausgeschlossen werden kann.

5.6 Praktische Aspekte Belagstypen

Die nachfolgenden Abschnitte sollen einigen zusätzlichen Aspekten dieses Projekts gerecht werden. So sollen Aspekte wie die Ökobilanz, die Verfügbarkeit von Materialien, die Aspekte zum Unterhalt dieser Beläge sowie der allfällige Aufpreis bei der Auswahl der Beläge angesprochen werden.

5.6.1 Verfügbarkeit Materialien

Das Gestein, welches für die Teststrecken verwendet wurde, stammt aus Nordfrankreich, da Gestein in dieser Helligkeit und Qualität in der Schweiz aktuell nicht verfügbar ist. Dies hat durch den weiten Transportweg einen negativen Einfluss auf die Ökobilanz und die Kosten. Es ist zu erwarten, dass bei einer breiteren Anwendung dieser Materialien einerseits die Preise für die Rohstoffe sinken und dass Quellen in der näheren Umgebung in Betracht gezogen werden.

5.6.2 Praktische Aspekte zum Unterhalt

In Bezug auf Reinigung und Winterdienst sollten keine zusätzlichen Massnahmen oder Änderungen nötig sein. Grundsätzlich ist aber mit einer reduzierten verkehrstechnischen Lebensdauer zu rechnen. Sobald Rissbildung einsetzt, werden automatisch gängige Reparaturtechniken (wie z.B. Verguss der klaffenden Risse mit schwarzer Bitumenmasse) zum Einsatz kommen. Je nach Oberfläche wird es dadurch zu optischen Veränderungen kommen, die stärker kontrastiert sind als bei herkömmlichen Belägen. Auf die kühlende Wirkung (sofern diese zu diesem Zeitpunkt noch vorhanden ist) sollte dies weniger Einfluss haben als auf die Ästhetik.

5.6.3 Preis

Die Kategorien der folgenden Zusammenstellung sind identisch mit den Bauweisen wie auf den Teststrecken in Bern und Sion ausgeführt und ausgewertet:

Tabelle 5: Zu erwartende Mehrkosten pro Quadratmeter und Anwendungstyp. Die Kosten sind geschätzt anhand Erfahrungen beim Einbau der Teststrecken (Quelle: Weibel AG).

Typ	Kategorie	Beschreibung	Mehrkosten
T1	Absplittung / Low Cost	Abstreuerung Standardbelag (z. B. SMA 8) mit oder ohne Vorumhüllung, keine lärmindernde Wirkung	2-8 CHF/m ²
T2	Kornersatz / Medium Cost	50-100% Ersatz des Grobkornes mit hellem Splitt im dichten oder SDA-Belag, plus Oberflächenbehandlung, mit SDA optional lärmarm	10-50 CHF/m ²
T3	Farbanstrich / High Cost	Heller Farbanstrich auf neuem oder bestehendem Belag, dicht, verkehrstechnisch konforme Griffigkeit	60-90 CHF/m ²
T4	Farbbelag / Med-High Cost	Farbbelag, dicht, mit Spezialbitumen, Pigment und/oder Spezialgestein, keine lärmindernde Wirkung	40-70 CHF/m ²

Die Preisspanne ergibt sich aus Optionen beim Einbau bzw. der Oberflächenbehandlung und Grösse des Projekts. Details zur Technologie (Qualität der Materialien und Einbau) liegen beim Unternehmen. Es ist zu erwarten, dass bei einer verbreiteten Anwendung die Preise für die Rohstoffe sinken und dass sich Quellen in der Schweiz finden lassen.

6. Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Pilotprogramms *Anpassung an den Klimawandel* wurden in diesem Projekt *Mit kühlen Strassenbelägen den Effekt von Hitzeinseln reduzieren* in Bern und Sion 12 unterschiedliche Belagstypen hinsichtlich ihrer kühlenden Wirkung getestet. Dabei handelt es sich um konventionelle AC, SMA und SDA Beläge mit unterschiedlicher Modifikation zur Aufhellung der Belagsoberfläche. Die Testbeläge lassen sich damit in vier Gruppen kühlender Technologien einteilen.

Die in Kapitel 5 dargestellten Resultate zeigen eine kühlende Wirkung aller untersuchten Technologien auf allen Testabschnitten. Die getesteten Belagstypen sowie die angewandten Technologien sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

- **Wirkung im internationalen Vergleich:** Die Forschungsergebnisse früherer Projekte (Cong et al., 2016; Ferrari et al., 2020; Kinouchi et al., 2004a; M. Santamouris, 2013; Stempihar et al., 2012) sind mit den Resultaten dieses Projekts vergleichbar. Die gemessenen Temperaturunterschiede bewegen sich in derselben Grössenordnung bis zu einem maximalen Temperaturunterschied von 13 °C.
- **Wirkung durch Veränderung der Albedo:** Belagstypen, welche lediglich eine Veränderung der Oberflächenhelligkeit und somit der Albedo beinhalten, zeigen sehr gute Resultate. Dabei ist zu beobachten, dass die Temperaturen an der Oberfläche kühler sind als bei den Referenzbelägen, und dass die Temperaturen in den tieferen Schichten aber ähnlich hoch sind wie diejenigen der Referenzbeläge.
- **Wirkung durch Porosität (Lufteinschluss):** Beläge mit porösen Oberflächen zeigen die besten Resultate. Dabei zeigen sie gegenüber den Referenzbelägen nicht nur an der Oberfläche eine kühlere Temperatur, sondern auch in den tieferen Schichten.
- **Weitere Vorteile poröser Beläge:** Ein zusätzlicher kühlender Effekt ergibt sich ausserdem bei porösen Belägen durch die Hohlräume, welche bei Niederschlag mehr Wasser aufnehmen und dadurch indirekt über die Verdunstung zu einer zusätzlichen Abkühlung beitragen.

6.1 Empfohlene Technologien nach Anwendungsbereich

Die Auswahl der geeigneten Technologie ist komplex und hängt von äusseren Gegebenheiten ab. Die Bauweise des Belags sowie der Anwendungsort und die lärmindernde Wirkung spielen dabei genauso eine Rolle wie die entstehenden Mehrkosten und der Initialzustand der zu ersetzenden Fahrbahn. Die Übersicht in Tabelle 6 ist als Auswahlhilfe gedacht. Für jeden Belagstyp werden die in diesem Projekt evaluierten Teilgrössen, die Bauweise, die Mehrkosten und eine Empfehlung zum Anwendungsbereich angegeben.

Tabelle 6: Zusammenfassung der ausgewählten Testbeläge inklusive kühlende Wirkung, Lärminderungspotenzial und Mehrkosten bei Einbau.

Technologieart	Farbanstrich	Abstreuerung	Farbbelag	Kornerersatz
Empfohlen wenn	Strasseninfrastruktur intakt, dichter Belag (z. B. AC), Oberfläche nicht übermässig aufgearbeitet	Deckschichtenrenewerung erforderlich, auf Strassen ohne Lärmproblem	Neugestaltung von Platz/Fussgängerzonen, als gestalterisches Element	Deckschichtenrenewerung erforderlich, auf lärmarmen Strassen
Kosten	Mehrkosten: 60-90 CHF/m ²	Mehrkosten: 2-8 CHF/m ²	Mehrkosten: 40-70 CHF/m ²	Mehrkosten: 10-50 CHF/m ²
Bauweise	AC 8 + Farbanstrich	SMA 8 + Abstreuerung helles Gestein	AC 8 (Farbbitumen, farbiges Gestein)	SDA 4-16 Ersatz der Kornfraktion mit hellem Gestein
Ausführung	Hellgrau	Mit oder ohne Vorumhüllung (650-900gr)	Hellgrau	50-100% helles Gestein, geschliffen oder wassergestrahlt
Kühlende Wirkung (an Oberfläche)	-6 °C (ø24h: -1.5 °C)	-9.5 °C (ø24h: -5.5 °C)	-5.5 °C (ø24h: -2 °C)	-12 °C (ø24h: -7 °C)
Lärminderung (nach Einbau)	-7 dB	-4.5 bis -2.5 dB	-3 dB	-8 bis -6.5 dB

6.2 Ökologische Aspekte

Die ökologischen Aspekte wurden in diesem Projekt nicht gesondert untersucht. So wurde keine Life-Cycle Analyse oder ein Quervergleich der verwendeten Materialien in Bezug auf Nachhaltigkeit oder graue Energie vollzogen. Ebenfalls wurden keine Analysen zur Umweltverträglichkeit der Farbstoffe oder ähnliches durchgeführt. Dies erweist sich im Nachhinein als Mangel, da diese Fragen offenbleiben. Diese Aspekte müssten in jedem Fall bei späteren Untersuchungen nachgeholt werden.

Was so weit beantwortet werden kann, ist, dass es sich bei den Farbanstrichen um einen Kunststoff auf Methacrylatharz-Basis handelt. Dies ist ein lösemittelfreie 2K-Kaltplastikmasse, welche direkt auf den Belag aufgebracht wird. Für die Farbgebung sind noch Füllstoffe (Quarzsand oder Pigmente) aufgebracht und die Griffigkeit der Masse wird durch die Aufbringung eines Griffigkeitsmittels erreicht.

Allgemein handelt es sich dabei um Anstriche, welche speziell für die Flächenmarkierung im Strassenbau entwickelt wurden. Aus diesem Grund kann ein ökologisches Risiko grundsätzlich ausgeschlossen werden. Es gilt jedoch in jedem Fall zu beachten, dass sich durch den Einsatz von reaktiven Kunststoffen die Ökobilanz verschlechtert. Die Menge an aufgebracht Farbe wie im vorliegenden Projekt verwendet, dürfte dabei in der Grössenordnung der Menge an Bindemittel (Bitumen) in der Deckschicht sein. Beim Asphalt hat das Bitumen nachweislich den grössten Einfluss auf die Ökobilanz. Es gilt zu beachten, dass sich die Ökobilanz drastisch verschlechtert, wenn die Lebensdauer dieser Farbe tiefer liegt als diejenige des Belags, wovon mit aktuellen Angaben zu rechnen ist.

6.3 Weitere erforderliche Arbeiten

Bei der kurzen Zeitdauer dieses Projekts, konnten einige Aspekte nicht abgedeckt werden, welche hier als Fragestellungen für weitere Untersuchungen aufgezählt werden:

- Ökologische Fragen hinsichtlich Life-Cycle, Nachhaltigkeit, graue Energie und Umweltverträglichkeit konnten nicht vertieft evaluiert werden.
- Die Alterung der kühlenden Technologie unter Verkehrsbeanspruchung und während allen Jahreszeiten konnte nicht untersucht werden.
- Die Wirksamkeit in Bezug auf das Stadtklima konnte nicht eruiert werden, da es sich um kleinräumige Strassenabschnitte handelt, die teilweise nicht direkt in einem urbanen Bereich lagen.
- Alle Fragen hinsichtlich der Sicherheit, der Ästhetik, der Sichtbarkeit und der Dauerhaftigkeit konnten innerhalb des kurzen Zeitraums nicht vertieft evaluiert werden.
- Die Wirkung der Beläge in einem ausgeprägten Hitzesommer, welcher viel mehr Hitzetage bzw. längere Hitzeperioden als 2020 aufweist, konnte nicht vertieft evaluiert werden.
- Die Wirkung der Beläge kombiniert mit anderen Massnahmen wie Begrünungen, Wasseranwendung oder kühlende Gebäude konnten ebenfalls nicht evaluiert werden.
- Weitere Belagstechnologien, welche weniger nahe an den schweizerischen Normen sind, konnten ebenfalls nicht vertieft untersucht werden.

Grolimund + Partner AG



Erik Bühlmann



Vincent Roth

7. Bibliografie

- Akademien der Wissenschaften Schweiz. (2016). Brennpunkt Klima Schweiz: Grundlagen, Folgen und Perspektiven. *Swiss Academies Reports*, 11 (5), 1–218.
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Akbari, Hashem, Damon Matthews, H., & Seto, D. (2012). The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. *Environmental Research Letters*, 7(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024004>
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. (2020). *Klimabulletin Sommer 2020*.
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2018). Hitze in Städten. Grundlage für eine klimaangepasste Siedlungsentwicklung. In *Umwelt-Wissen*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/hitze-in-staedten.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU. (2020). Klimawandel in der Schweiz. In *Umwelt-Zustand: Vol. UZ-0728-D*.
- Carnielo, E., & Zinzi, M. (2013). Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand. *Building and Environment*, 60, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.004>
- Christen, A., & Vogt, R. (2004). Energy and radiation balance of a central European City. *International Journal of Climatology*, 24(11), 1395–1421. <https://doi.org/10.1002/joc.1074>
- Coakley, J. A. (2003). Reflectance and Albedo, Surface. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (pp. 1914–1923). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00069-5>
- Cong, L., Zhang, Y., Xiao, F., & Wei, Q. (2016). Laboratory and field investigations of permeability and surface temperature of asphalt pavement by infrared thermal method. *Construction and Building Materials*, 113, 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.078>
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J. H., Willett, K. M., Aguilar, E., Brunet, M., Caesar, J., Hewitson, B., Jack, C., Klein Tank, A. M. G., Kruger, A. C., Marengo, J., Peterson, T. C., Renom, M., Oria Rojas, C., Rusticucci, M., ... Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(5), 2098–2118. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50150>
- Ferrari, A., Kubilay, A., Derome, D., & Carmeliet, J. (2020). The use of permeable and reflective pavements as a potential strategy for urban heat island mitigation. *Urban Climate*, 31(1997), 100534. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100534>
- Grimmond, C. S. B., Ward, H. C., & Kotthaus, S. (2016). How is urbanization altering local and regional climate? In K. Seto, W. Solecki, & C. Griffith (Eds.), *The Routledge Handbook of Urbanization and Global Environmental Change* (First Edit, pp. 1–10). Routledge Publishing. www.routledge.com/products/9780415732260%0AHow
- Kinouchi, T., Yoshinaka, T., Fukae, N., & Kanda, M. (2004a). Development of cool pavement with dark colored high albedo coating. *Fifth Conference on Urban Environment*, 207–210.
- Kinouchi, T., Yoshinaka, T., Fukae, N., & Kanda, M. (2004b). Development of cool pavement with dark

- colored high albedo coating. *Fifth Conference on Urban Environment*, 207–210.
- Kyriakodis, G. E., & Santamouris, M. (2018). Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates - Results from a large scale urban mitigation project. *Urban Climate*, 24, 326–339. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.002>
- NCCS. (2018). CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz. In *Klimaneutral*. www.klimaszenarien.ch
- Office fédéral de l'environnement (BAFU/OFEV). (2018). Quand la ville surchauffe. Bases pour un développement urbain adapté aux changements climatiques. In *Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement, No 1812*:
- Ragettli, M. S., & Rössli, M. (2019). *Auswirkungen auf die Sterblichkeit & kantonale Präventionsmassnahmen* (Issue April).
- Ragettli, M. S., Vicedo-Cabrera, A. M., Schindler, C., & Rössli, M. (2017). Exploring the association between heat and mortality in Switzerland between 1995 and 2013. *Environmental Research*, 158(November 2016), 703–709. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.07.021>
- Rosenfeld, A. H., Romm, J. J., Akbari, H., & Lloyd, A. C. (1997). Painting the Town White -- and Green Urban. *Technical Review*, 1000.
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
- Santamouris, Mat. (2007). Heat Island Research in Europe: The State of the Art. *Advances in Building Energy Research*, 1(1), 123–150. <https://doi.org/10.1080/17512549.2007.9687272>
- Scherrer, S. C., Fischer, E. M., Posselt, R., Liniger, M. A., Croci-Maspoli, M., & Knutti, R. (2016). Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal of Geophysical Research*, 121(6), 2626–2637. <https://doi.org/10.1002/2015JD024634>
- Sen, S., & Roesler, J. (2016). Aging albedo model for asphalt pavement surfaces. *Journal of Cleaner Production*, 117, 169–175. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.019>
- Stempihar, J. J., Pourshams-Manzouri, T., Kaloush, K. E., & Rodezno, M. C. (2012). Porous Asphalt Pavement Temperature Effects for Urban Heat Island Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2293(1), 123–130. <https://doi.org/10.3141/2293-15>
- Vicedo-Cabrera, A. M., Ragettli, M. S., Schindler, C., & Rössli, M. (2016). Excess mortality during the warm summer of 2015 in Switzerland. *Swiss Medical Weekly*, 146(December), w14379. <https://doi.org/10.4414/smw.2016.14379>
- Xie, N., Akin, M., & Shi, X. (2019). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1605–1621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134>
- Zhou, B., Rybski, D., & Kropp, J. P. (2013). On the statistics of urban heat island intensity. *Geophysical Research Letters*, 40(20), 5486–5491. <https://doi.org/10.1002/2013GL057320>

Anhang

I Stündliche Mittelwerte aller Beläge an Tagen mit $T_{max} > 30\text{ °C}$ in Bern

Stündlich gemessene Mittelwerte aller Testbeläge mit Abstreuerung in Bern

Stunde	CP11	CP12	CP5A	CP5B	CP5C	Differenz zu Referenzbelag		
						DiffCP5A	DiffCP5B	DiffCP5C
0	22.2	21.3	21.2	20.2	20.7	1.1	2.0	1.6
1	22.8	21.8	20.5	20.0	20.4	2.3	2.8	2.4
2	22.6	21.6	20.0	19.4	19.9	2.6	3.2	2.7
3	21.8	20.5	19.5	19.5	19.9	2.3	2.4	1.9
4	21.1	19.8	19.0	18.9	19.4	2.1	2.2	1.7
5	20.4	19.2	18.5	18.3	18.8	1.9	2.1	1.6
6	19.8	18.7	17.8	17.3	17.8	2.0	2.5	2.0
7	19.9	19.3	17.5	17.2	17.7	2.4	2.7	2.2
8	21.8	21.6	18.4	18.3	19.4	3.4	3.6	2.4
9	25.9	26.6	22.8	22.7	24.9	3.1	3.1	1.0
10	29.2	30.3	27.4	27.9	31.2	1.8	1.3	-2.0
11	33.7	35.5	31.7	31.4	34.8	2.0	2.3	-1.1
12	40.6	42.7	35.4	34.9	38.3	5.2	5.7	2.3
13	45.7	46.8	37.7	37.2	41.0	8.0	8.5	4.8
14	47.3	48.3	39.5	39.3	43.1	7.8	8.0	4.2
15	47.5	48.5	39.4	39.2	42.8	8.2	8.3	4.7
16	45.6	46.5	37.8	37.6	41.1	7.8	8.0	4.5
17	41.1	44.5	34.1	34.1	35.1	7.0	7.0	6.0
18	34.7	36.4	30.2	30.2	32.4	4.5	4.5	2.3
19	32.5	33.3	27.2	27.6	30.1	5.3	4.9	2.4
20	30.0	30.2	25.5	25.4	28.0	4.5	4.6	2.0
21	27.3	27.3	24.7	23.9	26.6	2.6	3.4	0.7
22	25.0	24.7	23.4	22.7	25.5	1.6	2.3	-0.5
23	23.5	23.4	22.6	22.2	24.9	1.0	1.4	-1.4
Tag (6-22)	CP11	CP12	CP5A	CP5B	CP5C	CP11-CP5A	CP11-CP5B	CP11-CP5C
Mean	33.4	34.2	28.9	28.6	31.2	4.5	4.7	2.6
Max	47.5	48.5	39.5	39.3	43.1	8.2	8.5	6.0
Min	19.8	18.7	17.5	17.2	17.7	1.6	1.3	-2.0
Nacht (22-6)	CP11	CP12	CP5A	CP5B	CP5C	CP11-CP5A	CP11-CP5B	CP11-CP5C
Mean	22.1	21.1	20.2	19.8	20.6	1.9	2.3	1.5
Max	23.5	23.4	22.6	22.2	24.9	2.6	3.2	2.7
Min	20.4	19.2	18.5	18.3	18.8	1.0	1.4	-1.4

Stündlich gemessene Mittelwerte aller Testbeläge mit Farbanstrich in Bern

HH	CP11	CP12	CP1	CP2	Differenz zu Referenz	
					DiffCP1-CP11	DiffCP2-CP11
0	22.2	21.3	22.2	21.4	0.0	-0.9
1	22.8	21.8	22.1	20.8	-0.7	-2.0
2	22.6	21.6	21.8	20.3	-0.8	-2.4
3	21.8	20.5	21.4	19.8	-0.5	-2.0
4	21.1	19.8	20.8	19.4	-0.3	-1.7
5	20.4	19.2	20.2	18.9	-0.2	-1.5
6	19.8	18.7	19.5	18.3	-0.3	-1.5
7	19.9	19.3	19.2	18.0	-0.7	-1.9
8	21.8	21.6	21.7	19.0	-0.2	-2.9
9	25.9	26.6	25.9	22.6	0.1	-3.2
10	29.2	30.3	30.7	28.7	1.5	-0.5
11	33.7	35.5	33.7	33.0	0.1	-0.6
12	40.6	42.7	38.8	37.6	-1.8	-3.0
13	45.7	46.8	44.2	41.6	-1.5	-4.2
14	47.3	48.3	47.0	43.5	-0.3	-3.8
15	47.5	48.5	47.6	44.4	0.1	-3.1
16	45.6	46.5	45.6	40.6	0.0	-5.0
17	41.1	44.5	40.2	35.1	-0.9	-6.0
18	34.7	36.4	35.4	32.7	0.6	-2.0
19	32.5	33.3	32.1	30.8	-0.3	-1.7
20	30.0	30.2	29.0	28.6	-1.0	-1.4
21	27.3	27.3	26.7	26.6	-0.5	-0.7
22	25.0	24.7	24.8	24.7	-0.2	-0.3
23	23.5	23.4	23.7	23.6	0.2	0.1
Tag	CP11	CP12	CP1	CP2	CP1	CP2
Mittelwert	33.4	34.2	33.1	30.9	0.6	2.5
Max	47.5	48.5	47.6	44.4	1.8	6.0
Min	19.8	18.7	19.2	18.0	0.0	0.3
Nacht	CP11	CP12	CP1	CP2	CP1	CP2
Mittelwert	22.1	21.1	21.7	20.6	0.4	1.5
Max	23.5	23.4	23.7	23.6	0.8	2.4
Min	20.4	19.2	20.2	18.9	0.0	0.1

Stündlich gemessene Mittelwerte aller Testbeläge mit Farbkorn in Bern

				Differenz zu Referenz
HH	CP11	CP12	CP6	CP11-CP6
0.0	22.2	21.3	23.0	-0.7
1.0	22.8	21.8	22.5	0.3
2.0	22.6	21.6	22.0	0.6
3.0	21.8	20.5	21.8	0.0
4.0	21.1	19.8	21.3	-0.2
5.0	20.4	19.2	21.0	-0.6
6.0	19.8	18.7	20.4	-0.6
7.0	19.9	19.3	19.1	0.8
8.0	21.8	21.6	21.6	0.3
9.0	25.9	26.6	25.9	-0.1
10.0	29.2	30.3	29.9	-0.6
11.0	33.7	35.5	33.5	0.2
12.0	40.6	42.7	37.7	2.9
13.0	45.7	46.8	40.2	5.5
14.0	47.3	48.3	43.9	3.4
15.0	47.5	48.5	43.6	3.9
16.0	45.6	46.5	42.3	3.3
17.0	41.1	44.5	35.6	5.5
18.0	34.7	36.4	32.8	2.0
19.0	32.5	33.3	30.4	2.1
20.0	30.0	30.2	28.3	1.7
21.0	27.3	27.3	26.8	0.5
22.0	25.0	24.7	25.5	-0.5
23.0	23.5	23.4	24.9	-1.3
Tag	CP11	CP12	CP6	CP11-CP6
Mean	33.4	34.2	31.6	2.0
Max	47.5	48.5	43.9	5.5
Min	19.8	18.7	19.1	0.1
Nacht	CP11	CP12	CP6	CP11-CP6
Mean	22.1	21.1	22.4	0.2
Max	23.5	23.4	24.9	0.7
Min	20.4	19.2	21.0	-1.3

Stündlich gemessene Mittelwerte aller Testbeläge mit Kornersatz in Bern

HH	CP11	CP12	CP7	CP8A	CP8B	CP8C	Differenz zu Referenzbelag			
							DiffCP12-CP7	iffCP12-CP8A	iffCP12-CP8B	DiffCP12-CP8C
0	22.2	21.3	22.2	18.8	19.4	20.5	-0.9	2.5	1.9	0.8
1	22.8	21.8	21.9	18.2	18.8	20.3	-0.1	3.6	3.0	1.4
2	22.6	21.6	21.6	17.7	18.2	19.8	0.0	3.9	3.3	1.7
3	21.8	20.5	21.4	17.2	17.7	19.2	-0.9	3.4	2.8	1.3
4	21.1	19.8	21.1	16.7	17.2	18.7	-1.2	3.1	2.6	1.1
5	20.4	19.2	20.8	16.2	16.7	18.2	-1.6	3.0	2.5	1.0
6	19.8	18.7	20.0	15.6	16.0	17.5	-1.3	3.2	2.7	1.3
7	19.9	19.3	18.6	15.3	15.8	17.8	0.7	4.0	3.5	1.5
8	21.8	21.6	19.6	16.0	16.4	19.3	2.0	5.6	5.2	2.3
9	25.9	26.6	24.0	17.5	18.1	23.0	2.5	9.0	8.4	3.6
10	29.2	30.3	28.8	23.3	24.5	27.6	1.5	7.0	5.8	2.7
11	33.7	35.5	33.4	28.5	29.7	31.6	2.1	7.1	5.8	3.9
12	40.6	42.7	36.9	32.4	33.9	35.0	5.8	10.3	8.9	7.8
13	45.7	46.8	39.4	35.0	36.5	38.6	7.4	11.8	10.3	8.2
14	47.3	48.3	42.0	36.1	37.7	40.1	6.3	12.2	10.6	8.2
15	47.5	48.5	41.7	36.3	37.9	39.6	6.8	12.2	10.6	8.9
16	45.6	46.5	40.8	34.6	36.0	36.6	5.7	11.9	10.5	9.9
17	41.1	44.5	37.7	31.9	32.3	32.7	6.9	12.6	12.2	11.9
18	34.7	36.4	33.1	28.1	28.7	29.8	3.3	8.3	7.6	6.5
19	32.5	33.3	29.7	26.0	26.7	27.5	3.6	7.3	6.7	5.8
20	30.0	30.2	27.7	24.3	25.0	25.8	2.5	5.8	5.2	4.4
21	27.3	27.3	26.2	23.3	23.9	24.3	1.1	4.0	3.4	3.0
22	25.0	24.7	24.6	22.4	22.9	23.2	0.1	2.4	1.8	1.5
23	23.5	23.4	22.8	21.5	22.0	22.7	0.6	1.9	1.3	0.7
Tag	CP11	CP12	CP7	CP8A	CP8B	CP8C	DiffCP12-CP7	iffCP12-CP8A	iffCP12-CP8B	DiffCP12-CP8C
Mean	33.4	34.2	30.8	26.3	27.2	28.8	3.5	7.9	7.0	5.4
Max	47.5	48.5	42.0	36.3	37.9	40.1	7.4	12.6	12.2	11.9
Min	19.8	18.7	18.6	15.3	15.8	17.5	0.1	2.4	1.8	1.3
Nacht	CP11	CP12	CP7	CP8A	CP8B	CP8C	DiffCP12-CP7	iffCP12-CP8A	iffCP12-CP8B	DiffCP12-CP8C
Mean	22.1	21.1	21.7	18.0	18.6	19.9	0.8	3.0	2.5	1.2
Max	23.5	23.4	22.8	21.5	22.0	22.7	1.6	3.9	3.3	1.7
Min	20.4	19.2	20.8	16.2	16.7	18.2	0.0	1.9	1.3	0.7

II Stündliche Mittelwerte aller Beläge an Tagen mit Tmax > 30 °C in Sion

Stündlich gemessene Mittelwerte aller Testbeläge mit porösem Belag (SDA) in Sion

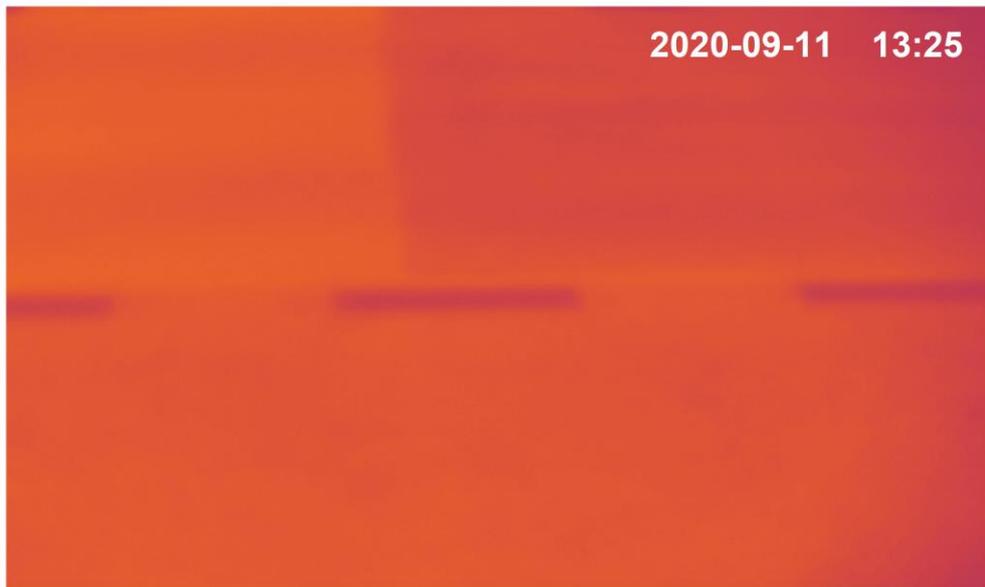
HH	CP25	CP30	CP21	CP22	CP23	CP24	Differenz zu Referenzbelag			
							CP30-CP21	CP30-CP22	CP30-CP23	CP30-CP24
0	26.4	26.2	24.2	24.0	24.4	24.2	2.2	2.4	2.0	2.2
1	25.5	25.4	23.5	23.2	23.9	23.8	2.0	2.4	1.6	1.8
2	24.6	24.5	22.9	22.6	23.2	23.1	1.8	2.1	1.4	1.5
3	24.0	23.9	22.4	22.1	22.7	22.7	1.6	1.9	1.2	1.2
4	23.0	22.9	21.7	21.5	22.3	22.3	1.3	1.6	0.7	0.7
5	22.3	22.1	21.1	20.8	21.9	21.9	1.2	1.4	0.3	0.3
6	21.3	21.3	20.7	20.5	21.7	21.5	0.6	0.9	-0.4	-0.1
7	21.0	21.1	20.8	20.5	21.5	21.5	0.2	0.5	-0.5	-0.5
8	23.1	24.3	24.2	21.6	22.0	22.4	-1.1	1.5	1.1	0.7
9	29.2	29.4	29.5	25.5	25.5	25.6	-0.3	3.7	3.6	3.6
10	35.1	35.2	34.8	30.2	30.2	31.3	0.4	5.0	5.0	3.8
11	41.3	41.0	40.6	34.7	34.7	36.8	0.7	6.6	6.5	4.5
12	46.2	46.0	44.4	38.4	38.1	40.5	1.8	7.8	8.1	5.7
13	50.0	49.6	49.1	41.9	41.2	43.8	0.9	8.1	8.8	6.1
14	52.7	50.3	50.1	43.0	42.2	44.9	2.6	9.7	10.5	7.8
15	53.0	51.3	48.4	41.7	40.9	43.2	4.6	11.3	12.1	9.8
16	50.9	49.8	46.0	40.0	38.9	41.9	4.8	10.8	12.0	9.0
17	47.2	46.2	42.4	36.1	36.1	38.5	4.8	11.2	11.1	8.7
18	42.9	42.0	38.3	33.4	32.5	34.4	4.6	9.5	10.4	8.4
19	37.5	37.2	34.1	30.0	29.2	30.8	3.4	7.5	8.3	6.7
20	33.2	33.1	31.0	27.7	27.5	28.8	2.2	5.4	5.7	4.3
21	30.6	30.5	28.9	25.6	25.6	26.8	1.7	4.9	4.9	3.7
22	29.2	29.0	27.3	24.2	24.7	25.8	1.9	5.0	4.4	3.4
23	27.8	27.6	26.1	23.3	24.4	25.3	1.7	4.5	3.4	2.5
Tag	CP25	CP30	CP21	CP22	CP23	CP24	CP30-CP21	CP30-CP22	CP30-CP23	CP30-CP24
Mean	37.9	37.5	35.9	31.5	31.3	32.9	2.1	6.4	6.7	5.1
Max	53.0	51.3	50.1	43.0	42.2	44.9	4.8	11.3	12.1	9.8
Min	21.0	21.1	20.7	20.5	21.5	21.5	0.2	0.5	0.4	0.1
Nacht	CP25	CP30	CP21	CP22	CP23	CP24	CP30-CP21	CP30-CP22	CP30-CP23	CP30-CP24
Mean	24.8	24.7	23.1	22.5	23.3	23.3	1.7	2.3	1.5	1.5
Max	27.8	27.6	26.1	24.0	24.4	25.3	2.2	4.5	3.4	2.5
Min	22.3	22.1	21.1	20.8	21.9	21.9	1.2	1.4	0.3	0.3

Stündlich gemessene Mittelwerte aller Testbeläge mit dichtem Belag (SMA) in Sion

Stunde	CP26	CP27	CP28	CP29	Differenz zu Referenz			
					CP30-CP26	CP30-CP27	CP30-CP28	CP30-CP29
0	22.6	22.5	22.4	23.2	3.6	3.8	3.8	3.0
1	22.0	21.8	22.0	22.7	3.4	3.7	3.5	2.7
2	21.4	21.2	21.3	22.1	3.1	3.3	3.2	2.4
3	20.9	20.7	21.0	21.7	2.9	3.2	2.9	2.2
4	20.3	20.1	20.6	21.3	2.6	2.9	2.4	1.7
5	19.7	19.4	20.3	20.9	2.5	2.7	1.9	1.3
6	19.3	19.0	20.0	20.6	2.0	2.2	1.3	0.7
7	18.9	19.1	19.8	20.5	2.2	2.0	1.3	0.6
8	21.3	22.3	22.4	22.2	3.0	2.0	1.9	2.1
9	25.7	26.3	26.5	25.1	3.7	3.1	3.0	4.3
10	30.1	31.2	31.1	30.1	5.0	4.0	4.0	5.1
11	35.8	36.7	35.1	34.1	5.1	4.2	5.9	6.9
12	39.6	40.5	38.8	37.6	6.4	5.5	7.2	8.4
13	44.0	44.0	41.8	40.8	5.6	5.5	7.8	8.8
14	45.2	45.3	42.9	41.7	5.1	5.1	7.4	8.6
15	43.5	43.8	41.5	40.2	7.8	7.5	9.8	11.1
16	42.0	42.2	40.1	38.9	7.8	7.6	9.7	10.9
17	38.5	38.0	37.3	36.8	7.7	8.2	8.9	9.5
18	36.1	35.0	33.2	32.9	5.9	7.1	8.8	9.1
19	32.4	31.5	29.8	29.5	4.8	5.7	7.4	7.7
20	29.4	28.6	27.8	27.4	3.7	4.5	5.3	5.6
21	27.3	26.7	25.9	25.3	3.3	3.8	4.6	5.2
22	25.8	25.6	24.9	24.3	3.3	3.4	4.2	4.7
23	24.5	24.4	24.5	23.9	3.1	3.3	3.2	3.7
Tag	CP26	CP27	CP28	CP29	CP30-CP26	CP30-CP27	CP30-CP28	CP30-CP29
Mittel	32.6	32.7	31.7	31.1	4.8	4.8	5.8	6.4
Max	45.2	45.3	42.9	41.7	7.8	8.2	9.8	11.1
Min	18.9	19.0	19.8	20.5	2.0	2.0	1.3	0.6
Nacht	CP26	CP27	CP28	CP29	CP30-CP26	CP30-CP27	CP30-CP28	CP30-CP29
Mittel	21.6	21.4	21.7	22.3	3.0	3.3	3.0	2.4
Max	24.5	24.4	24.5	23.9	3.6	3.8	3.8	3.7
Min	19.7	19.4	20.3	20.9	2.5	2.7	1.9	1.3

III Rohdatei Aufzeichnung Infrarotkamera

Visualisierung einzelner aufgezeichneter Bilddaten der Infrarotkamera in Sion

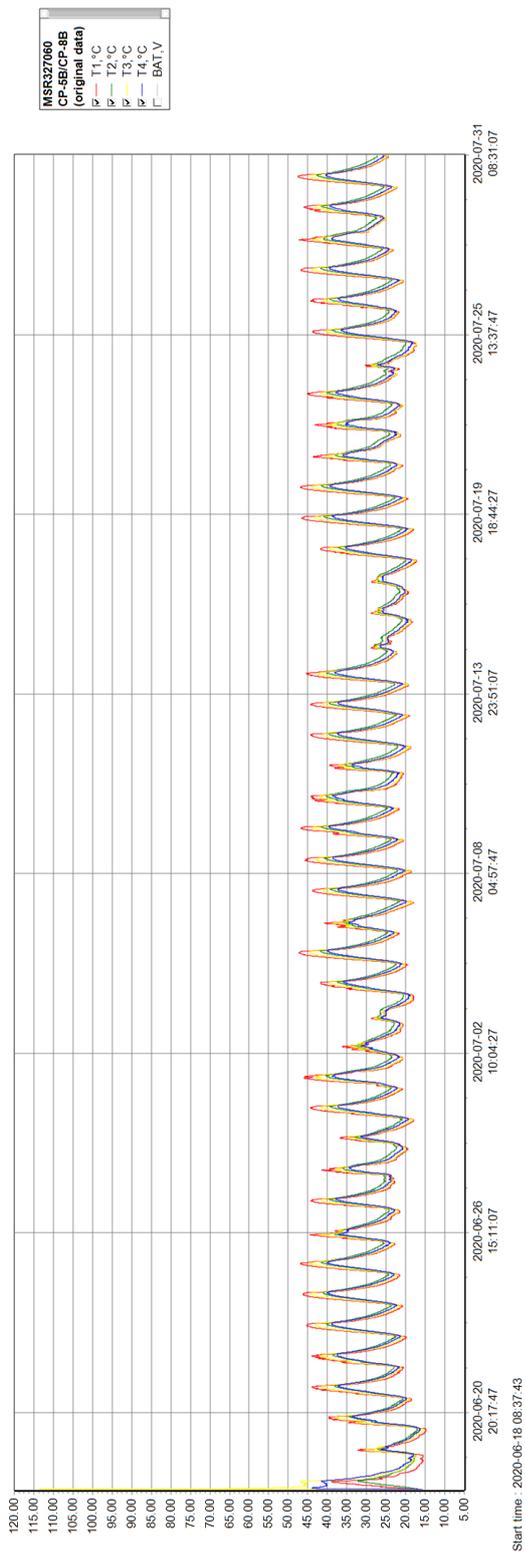


IV Visualisierung Rohdaten Aufzeichnung Belagssonden (MSR)

Rohdaten der Temperatursonden im Belag

TIME	T1	T2	T3	T4
18.06.2020 08:23	15.75	15.5	74.75	15.5
18.06.2020 08:28	15.75	15.75	31.5	16.25
18.06.2020 08:33	15.75	16	24.5	17.75
18.06.2020 08:38	15.75	15.75	64.5	19
18.06.2020 08:43	16.5	16	62.5	20
18.06.2020 08:48	16.75	16	57.25	21.25
18.06.2020 08:53	17	16	53.75	23
18.06.2020 08:58	17.25	16.25	49.75	24.25
18.06.2020 09:03	17.5	16.25	46.5	25.5
18.06.2020 09:08	17.75	16.5	44.25	26.5
18.06.2020 09:13	18	16.5	42.5	27.25
18.06.2020 09:18	18.5	16.5	41	27.75
18.06.2020 09:23	19.25	16.75	40.25	28
18.06.2020 09:28	19.75	16.75	39.5	28.25
18.06.2020 09:33	20.25	17	38.5	28.5
18.06.2020 09:38	20.75	17.25	38	28.5
18.06.2020 09:43	21.25	17.5	37.5	28.75
18.06.2020 09:48	21.75	17.75	37	28.75
18.06.2020 09:53	22	18	36.5	28.75
18.06.2020 09:58	22.25	18.25	36	29
18.06.2020 10:03	22.5	18.5	35.75	29
18.06.2020 10:08	23	18.5	35.75	29
18.06.2020 10:13	23.5	18.75	35.75	29
18.06.2020 10:18	23.75	19	35.5	29
18.06.2020 10:23	24.25	19.25	35.5	29
18.06.2020 10:28	24.5	19.5	35.5	29
18.06.2020 10:33	25	19.75	35.25	29
18.06.2020 10:38	25.5	20	35.25	29
18.06.2020 10:43	26	20.25	35.25	29
18.06.2020 10:48	26.5	20.5	35.5	29
18.06.2020 10:53	26.75	20.75	35.5	29
18.06.2020 10:58	27	21	35.25	29.25
18.06.2020 11:03	27	21.25	35	29.25
18.06.2020 11:08	26.75	21.5	34.75	29.25
18.06.2020 11:13	27.25	21.75	35	29.25
18.06.2020 11:18	27.75	22	35.25	29.25
18.06.2020 11:23	28.25	22	35.5	29.5
18.06.2020 11:28	28.75	22.25	35.75	29.5
18.06.2020 11:33	29.25	22.5	36	29.5
18.06.2020 11:38	29.25	22.75	36	29.5
18.06.2020 11:43	29.5	23	36	29.5
18.06.2020 11:48	29.75	23.25	36.25	29.75
18.06.2020 11:53	30.25	23.5	36.5	29.75
18.06.2020 11:58	30.5	23.75	36.75	29.75
18.06.2020 12:03	30.75	24	37	30
18.06.2020 12:08	31.25	24.25	37.25	30
18.06.2020 12:13	31.5	24.5	37.25	30
18.06.2020 12:18	31.75	24.75	37.5	30.25
18.06.2020 12:23	32	25	37.75	30.25
18.06.2020 12:28	32.25	25	37.75	30.5
18.06.2020 12:33	32.5	25.25	37.75	30.5
18.06.2020 12:38	32.25	25.75	37.75	30.5
18.06.2020 12:43	32.75	25.75	37.75	30.75
18.06.2020 12:48	33	26	37.75	30.75
18.06.2020 12:53	33.25	26	37.5	31

Visualisierung der Rohdaten auf einer Zeitachse. Dargestellt sind zwei Beläge mit je 2 Temperatursonden.



V CPX Messungen Bern

PavType	Name	STLN1TK	STLN2TK	Type	Kat
(CP-1) AC 11 S, Farbe 1	1AC11 F1	-5.8	-8.2	AC11	Standard
(CP-1) AC 11 S, Farbe 1	1AC11 F1	-5.8	-8.5	AC11	Standard
(CP-1) AC 11 S, Farbe 1	1AC11 F1	-5.8	-8.3	AC11	Standard
(CP-11) AC 11 S	5AC11Ref	-2.1	-4.0	AC11	Standard
(CP-11) AC 11 S	5AC11Ref	-1.8	-4.6	AC11	Standard
(CP-11) AC 11 S	5AC11Ref	-2.0	-4.4	AC11	Standard
(CP-2) AC 11 S, Farbe 2	1AC11 F2	-5.8	-8.1	AC11	Standard
(CP-2) AC 11 S, Farbe 2	1AC11 F2	-6.1	-8.1	AC11	Standard
(CP-2) AC 11 S, Farbe 2	1AC11 F2	-5.8	-8.5	AC11	Standard
(CP-6) AC 8, Farbe 3	3AC8 Farb3	-3.0	-5.0	AC8	Standard
(CP-6) AC 8, Farbe 3	3AC8 Farb3	-2.6	-4.3	AC8	Standard
(CP-6) AC 8, Farbe 3	3AC8 Farb3	-2.0	-4.5	AC8	Standard
(CP-6) AC 8, Farbe 3	3AC8 Farb3	-1.8	-3.4	AC8	Standard
(CP-5A) SMA 8, Abstreuerung 1	4SMA8 Abstr1	-1.8	-5.3	SMA8	Standard
(CP-5A) SMA 8, Abstreuerung 1	4SMA8 Abstr1	-2.0	-5.1	SMA8	Standard
(CP-5A) SMA 8, Abstreuerung 1	4SMA8 Abstr1	-2.1	-5.1	SMA8	Standard
(CP-5A) SMA 8, Abstreuerung 1	4SMA8 Abstr1	-2.3	-5.5	SMA8	Standard
(CP-5B) SMA 8, Abstreuerung 2	4SMA8 Abstr2	-1.5	-5.1	SMA8	Standard
(CP-5B) SMA 8, Abstreuerung 2	4SMA8 Abstr2	-1.1	-5.1	SMA8	Standard
(CP-5B) SMA 8, Abstreuerung 2	4SMA8 Abstr2	-1.4	-5.0	SMA8	Standard
(CP-5B) SMA 8, Abstreuerung 2	4SMA8 Abstr2	-1.5	-5.1	SMA8	Standard
(CP-5C) SMA 8, Abstreuerung 3	4SMA8 Abstr3	-1.2	-4.2	SMA8	Standard
(CP-5C) SMA 8, Abstreuerung 3	4SMA8 Abstr3	-1.1	-4.6	SMA8	Standard
(CP-5C) SMA 8, Abstreuerung 3	4SMA8 Abstr3	-1.4	-4.5	SMA8	Standard
(CP-5C) SMA 8, Abstreuerung 3	4SMA8 Abstr3	-1.4	-4.7	SMA8	Standard
(CP-12) SDA 4-16	7SDA4Ref	-4.4	-9.1	SDA4	Lärmarm
(CP-12) SDA 4-16	7SDA4Ref	-6.0	-9.3	SDA4	Lärmarm
(CP-12) SDA 4-16	7SDA4Ref	-6.3	-9.4	SDA4	Lärmarm
(CP-12) SDA 4-16	7SDA4Ref	-6.5	-9.5	SDA4	Lärmarm
(CP-8A) SDA 5-16 hell, w-gestrahlt	6SDA5 Wges	-6.3	-9.4	SDA5	Lärmarm
(CP-8A) SDA 5-16 hell, w-gestrahlt	6SDA5 Wges	-6.1	-10.3	SDA5	Lärmarm
(CP-8A) SDA 5-16 hell, w-gestrahlt	6SDA5 Wges	-6.7	-10.0	SDA5	Lärmarm
(CP-8A) SDA 5-16 hell, w-gestrahlt	6SDA5 Wges	-6.1	-10.1	SDA5	Lärmarm
(CP-8B) SDA 5-16 hell, geschliffen	6SDA5 Geschl	-5.4	-8.1	SDA5	Lärmarm
(CP-8B) SDA 5-16 hell, geschliffen	6SDA5 Geschl	-5.0	-7.5	SDA5	Lärmarm
(CP-8B) SDA 5-16 hell, geschliffen	6SDA5 Geschl	-5.2	-7.8	SDA5	Lärmarm
(CP-8B) SDA 5-16 hell, geschliffen	6SDA5 Geschl	-5.6	-8.4	SDA5	Lärmarm
(CP-8C) SDA 5-16 hell	6SDA5 unbeh	-6.2	-9.4	SDA5	Lärmarm
(CP-8C) SDA 5-16 hell	6SDA5 unbeh	-5.9	-9.1	SDA5	Lärmarm
(CP-8C) SDA 5-16 hell	6SDA5 unbeh	-5.9	-9.0	SDA5	Lärmarm
(CP-8C) SDA 5-16 hell	6SDA5 unbeh	-5.5	-8.7	SDA5	Lärmarm
(CP-7) SDA 8 hell, w-gestrahlt	6SDA8 Wges	-5.4	-9.4	SDA8	Lärmarm
(CP-7) SDA 8 hell, w-gestrahlt	6SDA8 Wges	-4.9	-9.4	SDA8	Lärmarm
(CP-7) SDA 8 hell, w-gestrahlt	6SDA8 Wges	-5.7	-9.8	SDA8	Lärmarm

VI CPX Messungen Sion

PavType	STLN1TK	STLN2TK	Type
(CP-21) CP-SDA 5, 50% clair	-6.2	-7.5	SDA
(CP-21) CP-SDA 5, 50% clair	-5.9	-7.4	SDA
(CP-21) CP-SDA 5, 50% clair	-6.1	-7.8	SDA
(CP-22) CP-SDA 5, 50% clair, ponçage	-5.8	-6.8	SDA
(CP-22) CP-SDA 5, 50% clair, ponçage	-5.9	-7.8	SDA
(CP-22) CP-SDA 5, 50% clair, ponçage	-6.1	-7.1	SDA
(CP-22) CP-SDA 5, 50% clair, ponçage	-5.6	-7.1	SDA
(CP-22) CP-SDA 5, 50% clair, ponçage	-5.7	-6.7	SDA
(CP-22) CP-SDA 5, 50% clair, ponçage	-6.0	-7.4	SDA
(CP-23) CP-SDA 5, 100% clair, ponçage	-6.5	-8.1	SDA
(CP-23) CP-SDA 5, 100% clair, ponçage	-6.2	-7.2	SDA
(CP-23) CP-SDA 5, 100% clair, ponçage	-6.1	-7.6	SDA
(CP-23) CP-SDA 5, 100% clair, ponçage	-5.9	-7.1	SDA
(CP-24) CP-SDA 5, 100% clair	-7.5	-8.9	SDA
(CP-24) CP-SDA 5, 100% clair	-7.8	-9.0	SDA
(CP-24) CP-SDA 5, 100% clair	-7.7	-8.8	SDA
(CP-24) CP-SDA 5, 100% clair	-7.3	-8.7	SDA
(CP-24) CP-SDA 5, 100% clair	-6.7	-7.7	SDA
(CP-24) CP-SDA 5, 100% clair	-6.2	-7.0	SDA
(CP-25) SDA 4-12	-4.3	-6.4	SDA
(CP-25) SDA 4-12	-5.8	-7.1	SDA
(CP-25) SDA 4-12	-6.9	-8.7	SDA
(CP-25) SDA 4-12	-7.8	-9.9	SDA
(CP-26) SMA8 gravioné 2/5, jaune	-2.5	-5.8	SMA
(CP-26) SMA8 gravioné 2/5, jaune	-2.3	-5.2	SMA
(CP-26) SMA8 gravioné 2/5, jaune	-2.3	-5.2	SMA
(CP-26) SMA8 gravioné 2/5, jaune	-2.6	-5.6	SMA
(CP-27) SMA8 gravioné 2/5, blanc	-2.6	-5.9	SMA
(CP-27) SMA8 gravioné 2/5, blanc	-2.9	-6.3	SMA
(CP-27) SMA8 gravioné 2/5, blanc	-2.9	-6.4	SMA
(CP-27) SMA8 gravioné 2/5, blanc	-2.9	-5.7	SMA
(CP-27) SMA8 gravioné 2/5, blanc	-3.2	-6.1	SMA
(CP-27) SMA8 gravioné 2/5, blanc	-2.5	-6.3	SMA
(CP-28) SMA8 gravioné 2/5, blanc	-2.5	-5.8	SMA
(CP-28) SMA8 gravioné 2/5, blanc	-2.8	-6.3	SMA
(CP-28) SMA8 gravioné 2/5, blanc	-2.7	-6.0	SMA
(CP-28) SMA8 gravioné 2/5, blanc	-2.8	-6.1	SMA
(CP-29) SMA8 gravioné 5/8, jaune	-2.5	-6.2	SMA
(CP-29) SMA8 gravioné 5/8, jaune	-1.8	-5.4	SMA
(CP-29) SMA8 gravioné 5/8, jaune	-2.2	-5.6	SMA
(CP-29) SMA8 gravioné 5/8, jaune	-2.0	-5.7	SMA
(CP-29) SMA8 gravioné 5/8, jaune	-2.5	-5.6	SMA
(CP-29) SMA8 gravioné 5/8, jaune	-2.5	-6.4	SMA
(CP-30) SMA8	-1.2	-6.5	SMA
(CP-30) SMA8	-2.9	-6.3	SMA

VII Albedo Messungen und Berechnungen Bern

Albedo-Berechnung								
Bern, neue Murtenstrassen, kühle Beläge								
			Osten					
Foto 1962	Helligkeit	Albedo		Foto 1980	Helligkeit	Albedo		
Weisses Papier	255			Weisses Papier	255			
Schwarzes Papier	92.94	0.24		Schwarzes Papier	55.95	0.14		
Belag	140.2	0.36		Belag	193.77	0.49		
Foto 1965	Helligkeit	Albedo		Foto 1992	Helligkeit	Albedo		
Weisses Papier	255			Weisses Papier	255			
Schwarzes Papier	94.1	0.24		Schwarzes Papier	73.15	0.19		
Belag	129.88	0.33		Belag	197.48	0.50		
Foto 1968	Helligkeit	Albedo		Foto 1990	Helligkeit	Albedo		
Weisses Papier	255			Weisses Papier	255			
Schwarzes Papier	75.6	0.19	Schwarzes Papier	71.5	0.18			
Belag	135.19	0.34	Belag	197.51	0.50			
Foto 1971	Helligkeit	Albedo	Foto 1986	Helligkeit	Albedo			
Weisses Papier	255		Weisses Papier	255				
Schwarzes Papier	65.21	0.17	Schwarzes Papier	69.58	0.18			
Belag	229.65	0.59	Belag	187.58	0.48			
Foto 1975	Helligkeit	Albedo	Foto 1984	Helligkeit	Albedo			
Weisses Papier	255		Weisses Papier	255				
Schwarzes Papier	88.03	0.22	Schwarzes Papier	62.16	0.16			
Belag	227.51	0.58	Belag	148.88	0.38			
Foto 1977	Helligkeit	Albedo	Foto 1980	Helligkeit	Albedo			
Weisses Papier	255		Weisses Papier	255				
Schwarzes Papier	93.89	0.24	Schwarzes Papier	90.58	0.23			
Belag	133.19	0.34	Belag	117.06	0.30			
			Westen					