

Überprüfung der aktuellen Neutralisationstemperatur für den Spannungsausgleich an Schienen in Schweizer Normalspur-Bahninfrastrukturen

Impressum



Autor

Lukas Roessler, SBB AG

Herausgeber

Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, <https://allianz-fahrweg.ch>

ISBN

978-3-907456-06-4

Lizenz

Solange nichts anderes angegeben ist, sind die Inhalte dieses Dokuments unter der Lizenz [CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) freigegeben. Für die Nutzung von Teilen, die nicht der Allianz Fahrweg Normalspur gehören, kann die Erlaubnis des jeweiligen Rechteinhabers notwendig sein.

Link

<https://www.allianz-fahrweg.ch/publications/9783907456064.pdf>

Zitierung

Roessler, L. (2026). «Überprüfung der aktuellen Neutralisationstemperatur für den Spannungsausgleich an Schienen in Schweizer Normalspur-Bahninfrastrukturen». Bern: Allianz Fahrweg Normalspur, ISBN 978-3-907456-06-4, <https://www.allianz-fahrweg.ch/publications/9783907456064.pdf>

Version

1.0.0

Interne Referenznummer

PRJ-100-083-201

Inhaltsverzeichnis

1	Management Summary	6
2	Einleitung	7
3	Theoretische Grundlagen	8
4	Aufbau des Projekts	12
5	Historischer Verlauf der Neutralisationstemperatur	13
6	Ermittlung der maximalen Schienentemperatur	16
6.1	Gleistest mit Schienentemperaturmessungen	16
6.1.1	Übersicht	16
6.1.2	Messkonzept Gleistest permanente Temperaturmessung	17
6.1.3	Messergebnisse	18
6.2	Manuelle Schienentemperaturmessungen im Gleis	22
6.2.1	Messkonzept	22
6.2.2	Testorte und Messergebnisse	23
6.2.3	Temperaturvergleich unterschiedlicher Schienenprofile	31
6.2.4	Erläuterung der Temperaturdifferenz zwischen Streckengleis und Stockschiene	33
6.2.5	Weitere Feststellungen	33
6.3	Grundlagen für die Ermittlung der maximalen Schienentemperatur	35
6.3.1	Datengrundlage für Exponierung West-Südwest	38
6.3.2	Datengrundlage für Exponierung Süd-Südwest	38
6.3.3	Datengrundlage für Exponierung Süd-Südost	38
6.3.4	Datengrundlage für Exponierung Ost-Südost	40
6.3.5	Funktionen für die Berechnung der maximalen Schienentemperaturen	41
6.3.6	Rückrechnung zur Überprüfung der Funktionen	43
7	Auswertung von Lufttemperaturdaten	46
7.1	Bereitstellung der Daten	46
7.2	Datenauswertung der meteoblue AG	49
8	Zukünftige Neutralisationstemperatur	58
8.1	Definition und Berechnung der minimalen Schienentemperatur	58
8.2	Berechnung der maximalen Schienentemperatur	62
8.3	Berechnung des Sicherheitsbeiwerts	63
8.4	Berechnung der Neutralisationstemperatur	63
8.5	Einfluss von Restwärme aus dem Schotterbett auf die maximale Schienentemperatur	71
9	Fazit	72
10	Literaturverzeichnis	74
11	Anhang: Abschlussbericht Schienentemperaturmessungen InfraMT	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auswertung Gleisdeformation und Schienenbrüche SBB	7
Abbildung 2: Forschungsergebnisse zum unterschiedlichen Tagestemperaturverlauf von Schienen in Exponierung Ost-Südost (OSO), Süd-Südost (SSO) und Süd-Südwest (SSW).....	10
Abbildung 3: Forschungsergebnisse zum unterschiedlichen Temperaturverlauf von Schienen in Exponierung West-Südwest (WSW), Südwest (SW) und Süd-Südwest (SSW)	11
Abbildung 4: Lufttemperaturverlauf Basel von 1900 bis 2022	13
Abbildung 5: Lufttemperaturverlauf Stabio 1982 bis 2022	14
Abbildung 6: Historischer Verlauf der Neutralisationstemperatur in der Schweiz	15
Abbildung 7: Karte Messstandorte Schienentemperaturen	17
Abbildung 8: Messkonzept Gleistest	18
Abbildung 9: Maximale Tagestemperaturen der Schienen auf Thurbrücke Ossingen	18
Abbildung 10: Maximale Tagestemperaturen der Schienen zwischen Pratteln und Frenkendorf ..	19
Abbildung 11: Maximale Tagestemperaturen der Schienen in Basel	19
Abbildung 12: Maximale Tagestemperaturen der Schienen in Visp	20
Abbildung 13: Maximale Tagestemperaturen der Schienen in Chiasso	20
Abbildung 14: Maximale Tagestemperaturen der Schienen in Lugano Vedeggio	21
Abbildung 15: Maximale Tagestemperaturen der Schienen zwischen Luzern Verkehrshaus und Meggen	21
Abbildung 16: Fluke 62 Max für Schienentemperaturmessungen von Hand im Gleis	22
Abbildung 17: Situation Schienentemperaturmessungen Münchenstein	23
Abbildung 18: Diagramm Temperaturverläufe Münchenstein	24
Abbildung 19: Situation Schienentemperaturmessungen Coppet	25
Abbildung 20: Diagramm Temperaturverläufe Coppet	26
Abbildung 21: Situation Schienentemperaturmessungen Rheinfelden	27
Abbildung 22: Diagramm Temperaturverläufe Rheinfelden	28
Abbildung 23: Situation Schienentemperaturmessungen Allaman	29
Abbildung 24: Diagramm Temperaturverläufe Allaman	30
Abbildung 25: EN 54E2 Schiene Gleis 75 mit normalem Fahrspiegel	31
Abbildung 26: EN 60E2 Schiene Gleis 74 mit normalem Fahrspiegel	31
Abbildung 27: EN 46E1 Schiene Gleis F7 mit breitem Fahrspiegel	31
Abbildung 28: Messstandorte Rheinfelden	33
Abbildung 29: EN 54E2 Schiene Gleis 75 mit Temperaturüberwachung	34
Abbildung 30: EN 54E2 Schiene Gleis 66 mit einmaliger Vergleichsmessung	34
Abbildung 31: Sensitivitätskurve kritische Temperaturerhöhung vs. Bettungssteifigkeit für Schienenprofile	36
Abbildung 32: Mittelwert höchste Lufttemperaturen für Rheinfelden im Jahr von 2000 bis 2024 ...	39
Abbildung 33: Mittelwert höchste Lufttemperaturen in Wallbach im Jahr von 2000 bis 2024	40
Abbildung 34: Lineare Funktionen zur Berechnung der maximalen Schienentemperatur für unterschiedliche Gleisexponierungen	42
Abbildung 35: Rückrechnung Formel Schienentemperatur WSW	43
Abbildung 36: Rückrechnung Formel Schienentemperatur Exponierung Süd-Südwest (SSW)	44
Abbildung 37: Rückrechnung Formel Schienentemperatur OSO	45
Abbildung 38: Karte Bahnnetz Schweiz mit visualisierten Temperaturdaten	48
Abbildung 39: Detailansicht Karte Bahnnetz Schweiz mit visualisierten Temperaturdaten Raum Genfersee	48

Abbildung 40: Karte mit Datenvisualisierung minimale Lufttemperaturen 2060 nach SSP5-8.5....	50
Abbildung 41: Karte mit Datenvisualisierung maximale Lufttemperaturen 2060 nach SSP5-8.5...	51
Abbildung 42: Streckenabschnitte mit zusätzlich erforderlichen Massnahmen zur Gewährleistung der Gleislagesicherheit.....	70
Abbildung 43: Schienen- und Schottertemperaturverlauf während Hitzeperiode im Sommer.....	71
Abbildung 44: Darstellung unterschiedliche Schienen-temperaturen bei unterschiedlichen Exponierungen	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messdaten Schienentemperatur Münchenstein	24
Tabelle 2: Messdaten Schienentemperatur Coppet	26
Tabelle 3: Messdaten Schienentemperatur Rheinfelden.....	28
Tabelle 4: Messdaten Schienentemperatur Allaman	30
Tabelle 5: Vergleich der Temperaturen unterschiedlicher Schienenprofile	31
Tabelle 6: Ergebnisse der Temperaturmessungen in Gleisen 75 und 66	34
Tabelle 7: Vergleich der maximalen Luft- und Schienentemperaturen zwischen zwei Süd-Südost-exponierten Gleisen	38
Tabelle 8: Vergleich der maximalen Luft- und Schienentemperaturen zwischen zwei Ost-Südost-exponierten Gleisen	41
Tabelle 9: Die berechneten y-Achsenabschnitte für drei Orte und deren Mittelwert	41
Tabelle 10: Schienentemperaturen bei Lufttemperatur 32.5°C bei unterschiedlichen Schienenexponierungen.....	41
Tabelle 11: Parameter der linearen Funktionen bei unterschiedlichen Exponierungen	42
Tabelle 12: Vergleich Lufttemperaturdaten DfA-Linie 100	51
Tabelle 13: Tabelle mit relevanten Temperaturdaten pro DfA-Line in Vergangenheit	54
Tabelle 14: Tabelle mit relevanten Temperaturdaten pro DfA-Line in der Gegenwart	55
Tabelle 15: Tabelle mit relevanten Temperaturdaten pro DfA-Line in Zukunft SSP1-2.6	56
Tabelle 16: Tabelle mit relevanten Temperaturdaten pro DfA-Line in Zukunft SSP5-8.5	57
Tabelle 17: Berechnungsformel für Tiefste Jahrestemperatur der Schienen	59
Tabelle 18: Minimale Schienentemperaturen Vergangenheit und Gegenwart	60
Tabelle 19: Zukünftige minimale Schienentemperaturen	61
Tabelle 20: Berechnung der maximalen Schienentemperaturen	62
Tabelle 21: Neutralisationstemperatur mit Szenario SSP1-2.6	64
Tabelle 22: Neutralisationstemperatur mit Szenario SSP5-8.5	65
Tabelle 23: Szenario Beibehaltung aktuelle Neutralisationstemperatur	67
Tabelle 24: Szenario Erhöhung aktuelle Neutralisationstemperatur	68

1 Management Summary

Im Rahmen des Allianz-Fahrweg-Projekts «Überprüfung der aktuellen Neutralisationstemperatur» wird untersucht, ob die heute in der Schweiz geltenden Vorgaben zur Neutralisationstemperatur für lückenlose Normalspurgleise unter den Bedingungen des fortschreitenden Klimawandels weiterhin geeignet sind. Hintergrund der Untersuchung ist die zunehmende Anzahl von Gleisdeformationen während Hitzeperioden bei gleichzeitig rückläufigen Schienenbrüchen, was auf veränderte thermische Beanspruchungen der Gleise hinweist.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde ein mehrstufiges Vorgehen gewählt. Zunächst erfolgte eine Aufarbeitung des historischen Verlaufs der Neutralisationstemperatur seit Einführung des lückenlosen Gleises in der Schweiz ab den 1960er-Jahren. Anschliessend wurden zwischen 2023 und 2025 an sieben Standorten im Netz der SBB umfangreiche Schienentemperaturmessungen mit fest installierten Temperatursensoren durchgeführt. Zur Verifizierung der Daten aus den Festinstallationen wurde der Schienentemperaturverlauf an diversen anderen Standorten durch manuelle Messungen ermittelt. Die permanenten Schienentemperaturmessungen sowie auch die manuellen Messungen erfolgten an verschiedenen Schienenprofilen, Oberbauarten und Gleis-Exponierungen. Die Messdaten wurden mit bestehenden theoretischen Ansätzen verglichen und zur Ableitung linearer Funktionen genutzt, welche die maximale Schienentemperatur in Abhängigkeit der Lufttemperatur und der Exponierung beschreiben. Ergänzend dazu wurden hochaufgelöste historische, aktuelle und prognostizierte Lufttemperaturdaten (500 × 500 m Raster) für das gesamte Schweizer Normalspurbahnnetz ausgewertet, wobei Klimaszenarien bis zum Jahr 2060 berücksichtigt wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass Schienentemperaturen an sonnigen Hitzetagen deutlich über 60 °C erreichen können und stark von der Gleis-Exponierung, dem Schienenprofil sowie dem Zustand der Schienenoberfläche abhängen. Insbesondere Südwest- bis West-Südwest-exponierte Gleise weisen die höchsten Schienentemperaturen auf. Die Analyse der Lufttemperaturdaten belegt zudem eine signifikante Zunahme der maximalen Lufttemperaturen gegenüber der Zeit, in der die heute noch gültigen Neutralisationstemperaturen festgelegt wurden. Für zahlreiche Streckenabschnitte werden bis 2060 maximale Lufttemperaturen von über 40 °C prognostiziert.

Auf Basis der ermittelten minimalen und maximalen Schienentemperaturen sowie unter Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwerts wird ein Vorschlag für eine zukünftige, differenzierte Neutralisationstemperatur für die Netze der SBB, BLS, SOB und TPF erarbeitet. Der Bericht kommt zum Schluss, dass die aktuellen Vorgaben langfristig nicht mehr überall ausreichend sind und eine Anpassung der Neutralisationstemperatur ein zentrales Element zur Sicherstellung der Gleislagestabilität und der Betriebssicherheit unter den Bedingungen des Klimawandels darstellt.

Vorschlag zur Änderung der Neutralisationstemperatur zusammengefasst:

- Alpennordseite inkl. Wallis: $T_n = 28^\circ\text{C}$
- Alpensüdseite nördlich Lavorgo: $T_n = 28^\circ\text{C}$
- Alpensüdseite südlich Lavorgo: $T_n = 31^\circ\text{C}$

2 Einleitung

Die Klimaerwärmung hat weitreichende Auswirkungen auf verschiedene Aspekte der Bahninfrastruktur, darunter auch die Gleislagestabilität im Schienenverkehr. Mit steigenden Temperaturen, häufigeren Extremwetterereignissen und veränderten Niederschlagsmustern sehen sich Bahninfrastrukturen neuen Herausforderungen gegenüber. Höhere Lufttemperaturen können das Gleis destabilisieren, was zu einer erhöhten Gefahr von Gleisdeformationen führt.

In diesem Kontext ist es entscheidend, geeignete Massnahmen zur Anpassung und Verbesserung der Gleislagestabilität zu ergreifen, um die Sicherheit und Effizienz des Schienenverkehrs auch unter den Bedingungen des Klimawandels zu gewährleisten. Die Grundlage für ein klimawandelresilientes Bahngleis ist, dass es auch unter den veränderten klimatischen Bedingungen der kommenden Jahrzehnte betriebs- und sicherheitstauglich bleibt – trotz häufiger Hitze, Starkregen, Stürmen, Überschwemmungen und Frost-Tau-Wechsel. Ein klimawandelresilientes Bahngleis ist eine integrierte Kombination aus Materialwahl, Bauweise, Überwachung und Umfeldgestaltung, die extreme Wetterereignisse abfedern kann.

Eine Auswertung über die Anzahl Gleisdeformationen im Netz der SBB in Jahren mit vielen Hitzetagen, resp. Hitzeperioden in den Sommermonaten zeigt deutlich, dass die Anzahl Ereignisse pro Jahr zunehmen und die Sommer mit sehr hohen Temperaturen in immer kürzeren Abständen auftreten. In der gleichen Zeitperiode nimmt die Anzahl Schienenbrüche sehr stark ab. Dies zu einem Teil aufgrund der Klimaerwärmung und damit verbundenen mildereren Wintermonaten aber, v. A. im vergangenen Jahrzehnt, auch durch die kontinuierliche Verbesserung der Gleisbauqualität und der zerstörungsfreien Prüfung im Gleis.

Gemeldete Gleisdeformationen und Schienenbrüche pro Jahr

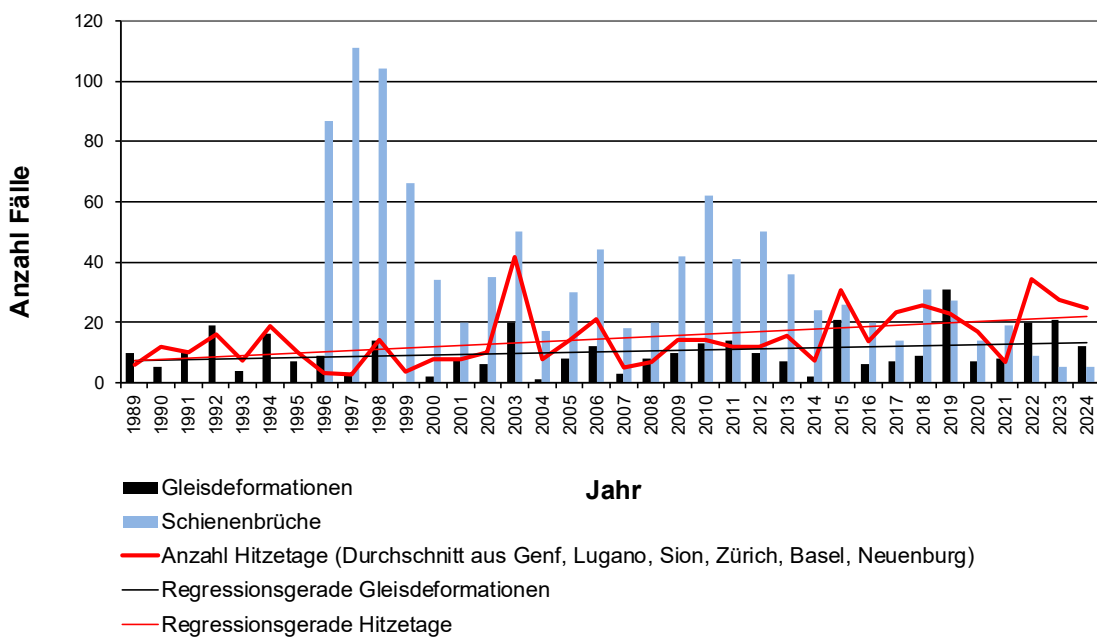


Abbildung 1: Auswertung Gleisdeformation und Schienenbrüche SBB

Die Frage, ob die reglementarischen Vorgaben zum Bau des lückenlosen Gleises, im Speziellen die Vorgaben zur Neutralisationstemperatur, heute und in Zukunft noch stimmen, liegt bei Betrachtung der Abbildung 1 nahe.

Im vorliegenden Bericht zum Allianz Fahrweg-Projekt «Überprüfung der aktuellen Neutralisationstemperatur» werden die für den Bau des lückenlosen Gleises zugrundeliegenden Vorgaben zur Neutralisationstemperatur untersucht. Die Neutralisationstemperatur ist diejenige Temperatur, bei der die Schiene im eingebauten Zustand keine Längsspannungen aufweist sofern der Spannungsausgleich der Schienen nach den reglementarischen Vorgaben ausgeführt wurde. Dies ist wichtig, damit weder übermässige Druckspannungen aufgrund starker Sonneneinstrahlung in den warmen Monaten noch übermässige Zugspannungen während kalten Winternächten zum Versagen der Gleisstabilität führen können.

3 Theoretische Grundlagen

Die für den Bau von lückenlosen Normalspurgleisen relevante Neutralisationstemperatur ist in den Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung AB-EBV zu Art. 31 EBV, AB 31, Kap. 2.3 festgelegt.

Im Regelfall sind bei der Konzeption des Gleises Längskräfte zu berücksichtigen, die je nach Schienenprofil und Verlegeart einer Temperaturschwankung von $\pm 40\text{ °C}$ um die mittlere Neutralisationstemperatur (in der Regel 25 °C) entsprechen. Weichen die örtlichen Verhältnisse eines Netzes resp. von Netzteilen von diesen Werten ab, ist das zu berücksichtigende Temperatur/Kräfte-Regime mittels aussagekräftiger Messungen zu erfassen und der Vorschlag für die anzuwendende Neutralisationstemperatur sowie die zu berücksichtigende Temperaturschwankung dem BAV zur Genehmigung vorzulegen.
(BAV, 2024)

Gemäss AB-EBV, AB 31, Kap 2.3 ist demzufolge eine Abweichung von der mittleren Neutralisationstemperatur von 25 °C möglich, falls örtliche Bedingungen dazu führen, dass die minimale oder maximale Schienentemperatur ausserhalb des zulässigen Bereichs liegt ($25 \pm 40\text{ °C}$). Ein Gleis muss bei derjenigen Temperatur neutralisiert werden, bei der eine Temperaturschwankung von $\pm 40\text{ °C}$ der Schienen weder im Winter noch im Sommer überschritten wird, d. h. die Zug- resp. Druckspannung nicht zum Versagen des Gleises (Schienenbruch oder Gleisdeformation) führen kann.

Das Vorgehen für den Bau des lückenlosen Gleises und damit verbunden die Neutralisationstemperatur ist in der Regelung «R RTE 22041 Lückenlose und verlaschte Gleise und Weichen Normalspur» des Verbands öffentlicher Verkehr VöV geregelt.

Im Freien ist generell eine Neutralisationstemperatur 25 °C mit einer Ausführungstoleranz von ± 3 °C einzuhalten. Auf nachfolgenden Streckenabschnitten sind besondere Neutralisationstemperaturen anzuwenden:

Neutralisationstemperatur	Temperatur und Ausführungstoleranz
Im Freien generell	25 °C ± 3 °C
Tessin, südlich Bahnhof Biasca	28 °C ± 3 °C
BLS Südrampe Lötschberg	28 °C ± 3 °C

(VöV, 2019)

Die unterschiedlichen Vorgaben zur Neutralisationstemperatur in der R RTE 22041 lassen darauf schliessen, dass im Tessin, südlich Biasca und auf der BLS Südrampe Lötschberg vom Rest der Schweiz abweichende Temperaturverhältnisse herrschen. Werden Lufttemperaturdaten von Meteo Schweiz ausgewertet, so liegt die mittlere Jahrestemperatur im südlichen Tessin bei rund 13°C und im Mittelland der Schweiz zwischen 8 und 12°C. Es ist anzunehmen, dass die Lufttemperaturverhältnisse im Südlichen Tessin im Vergleich zur restlichen Schweiz zu eher weniger kalten Schienen im Winter, dafür aber wärmeren Schienen im Sommer führen. Dem zugrundeliegend wurde für das südliche Tessin eine Erhöhung der Neutralisationstemperatur von 3°C auf 28°C bestimmt. Das gleiche gilt auch für die BLS Südrampe Lötschberg.

Als Grundlage für die Berechnung der Neutralisationstemperatur müssen die jährlichen maximalen und minimalen Schienentemperaturen bekannt sein. Die minimalen Schienentemperaturen können in kalten Winternächten ermittelt werden und liegen erfahrungsgemäss¹ im Bereich der Lufttemperatur selbst bis max. 3°C darunter. Bezüglich der maximalen jährlichen Schienentemperaturen sind bei der SBB keine genauen Kenntnisse vorhanden. Aus diversen Publikationen wissenschaftlicher Arbeiten und Fachbüchern geht jedoch hervor, dass Schienen während heissen Sommertagen Temperaturen von 55°C oder mehr erreichen können.

Beispiel 1: (Prager, 2007)

$$T_{\text{Schiene}} = \frac{T_{\text{Luft}} + 15,75}{0,925}$$

¹ Erfahrung aufgrund vielen persönlichen Schienentemperaturmessungen während Unterhaltsnächten im Winter bei der SBB.

Beispiel 2: (Braess, 2018)

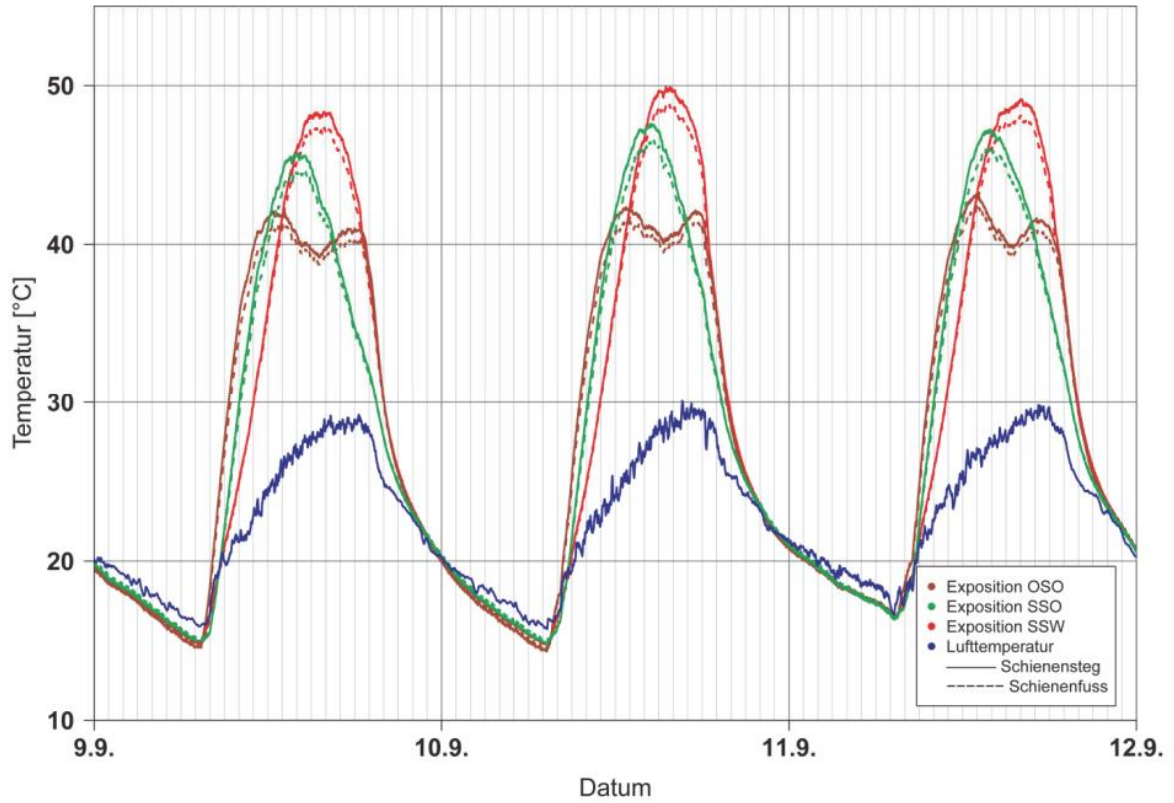


Abbildung 2: Forschungsergebnisse zum unterschiedlichen Tagestemperaturverlauf von Schienen in Exponierung Ost-Südost (OSO), Süd-Südost (SSO) und Süd-Südwest (SSW)

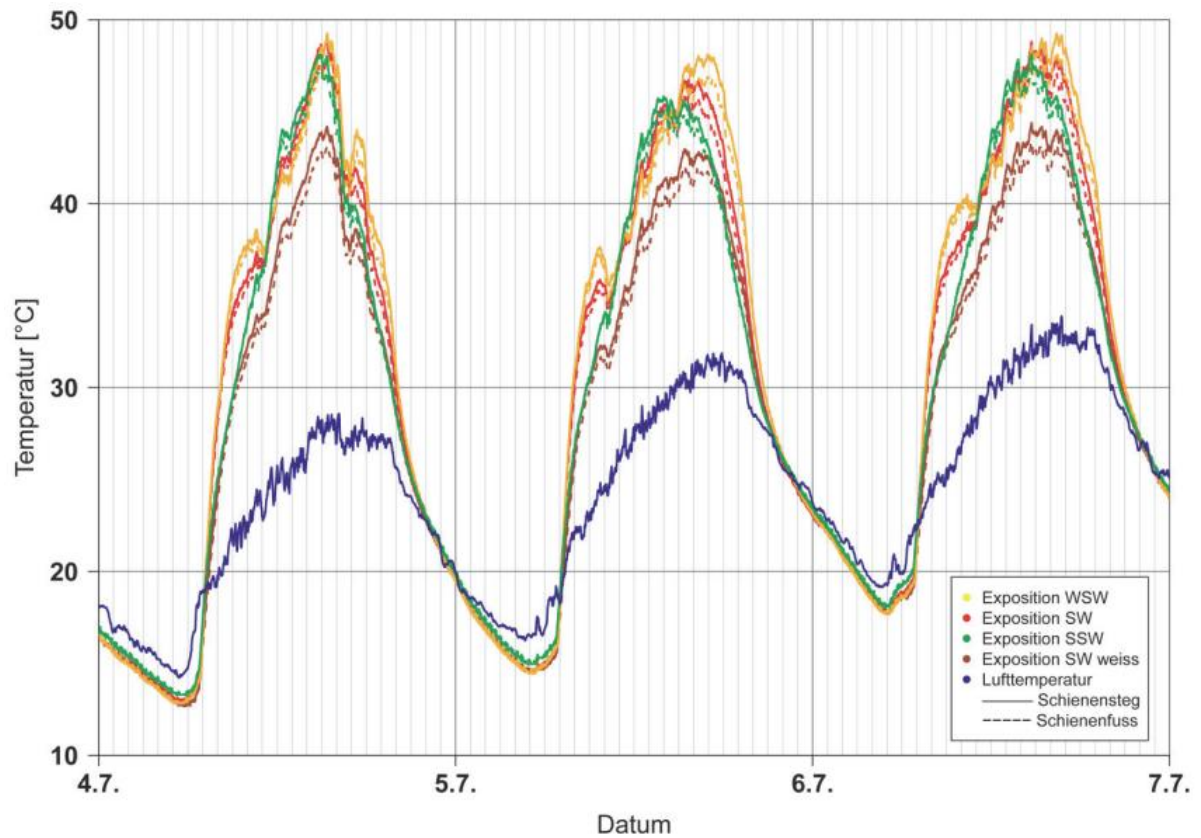


Abbildung 3: Forschungsergebnisse zum unterschiedlichen Temperaturverlauf von Schienen in Exposition West-Südwest (WSW), Südwest (SW) und Süd-Südwest (SSW)

Die Forschungsergebnisse aus der Dissertation von Hermann Patrick Braess (2018) zeigen auf, dass nicht nur die Lufttemperatur einen Einfluss auf die maximalen Schienentemperaturen hat, sondern auch die Exposition der Schienen, d. h. welcher Himmelsrichtung der Schienensteg exponiert ist. Exposition Süd-Südwest (SSW) bedeutet demzufolge, dass die Schiene von West-Nordwest (WNW) nach Ost-Südost (OSO) verläuft. Eine Schiene wird dann am heissesten, wenn die Sonne zum Zeitpunkt der höchsten Tageslufttemperatur genau im 90° Winkel zur Schienenlängsachse steht, also im 90° Winkel auf den Schienensteg scheint. Gemäss den Erkenntnissen aus der Dissertation werden in der Schweiz deshalb Schienen mit Exposition West-Südwest (WSW) am heissesten.

Sind die minimale und die maximale Schienentemperatur bekannt, kann die Neutralisationstemperatur berechnet werden.

In der Literatur wird die Berechnung der Neutraltemperatur der Schiene wie folgt beschrieben (Lichtberger, 2010):

$$T_{neutral,Schiene} = T_{min,Schiene} + \left[\frac{T_{max,Schiene} - T_{min,Schiene}}{2} \right] + 5^{\circ}C$$

Grundsätzlich ist die Formel für die Berechnung der Neutralisationstemperatur wie folgt aufgebaut:

$$T_n = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} + \Delta_{Sicherheit}$$

Mit:

$$\Delta_{Sicherheit} \{+5K, +10K\}$$

4 Aufbau des Projekts

Das Projekt «Überprüfung der aktuellen Neutralisationstemperatur» ist in vier Teilprojekte unterteilt.

1. Untersuchung des historischen Verlaufs der Regelung für die Neutralisationstemperatur.
2. Ermittlung der aktuell maximal erreichten Schienentemperaturen und Herleitung einer Funktion bzw. Formel für maximale Schienentemperatur bei beliebiger Lufttemperatur.
3. Auswertung von historischen und aktuellen Maximal- und Minimallufttemperaturen und Erstellung von Lufttemperaturprognosen für die Zukunft im Bereich der Normalspurbahnnetze in der Schweiz.
4. Ausarbeitung eines Vorschlags für die zukünftige Neutralisationstemperatur für die Normalspurbahnnetze der SBB, BLS, SOB und TPF.

Das erste Teilprojekt dient dazu, herauszufinden, seit wann in der Schweiz überhaupt lückenlose Gleise gebaut werden und ob die Vorgaben für die Neutralisationstemperatur in Vergangenheit bereits angepasst wurden oder nicht.

Im zweiten Teilprojekt werden an einigen Standorten im Gleisnetz der SBB die Schienentemperaturen über eine längere Zeitperiode gemessen, um herauszufinden, welche maximalen Schienentemperaturen aktuell erreicht werden können und ob sich daraus eine Formel zur Berechnung der maximalen Schienentemperatur bei einer beliebigen Lufttemperatur ableiten lässt. Weiter sollen die theoretischen Grundlagen aus wissenschaftlichen Arbeiten und Fachliteratur mit den Messungen und Feststellungen aus dem Praxistest im Gleisnetz verglichen und interpretiert werden.

Im dritten Teilprojekt werden mit Unterstützung eines externen Lieferanten Daten von historischen, aktuellen und prognostizierten Lufttemperaturen im Bereich der Bahninfrastruktur der Schweizer Normalspurbahnen analysiert. Diese Daten dienen im vierten Teilprojekt als Grundlage für die Berechnung und Beurteilung der zukünftigen Neutralisationstemperatur für die Normalspurbahnnetze der SBB, BLS, SOB und TPF.

5 Historischer Verlauf der Neutralisationstemperatur

Bei Betrachtung von Auswertungen über die minimalen und maximalen Lufttemperaturen pro Jahr und die jährliche Durchschnittslufttemperatur (Abbildung 4 und Abbildung 5) wird die globale Erwärmung gut ersichtlich. Sowohl auf der Alpennordseite in Basel als auch auf der Alpensüdseite in Chiasso steigen die minimalen und maximalen Lufttemperaturen pro Jahr an und auch anhand des Verlaufs der jährlichen Durchschnittslufttemperatur ist der Anstieg deutlich.

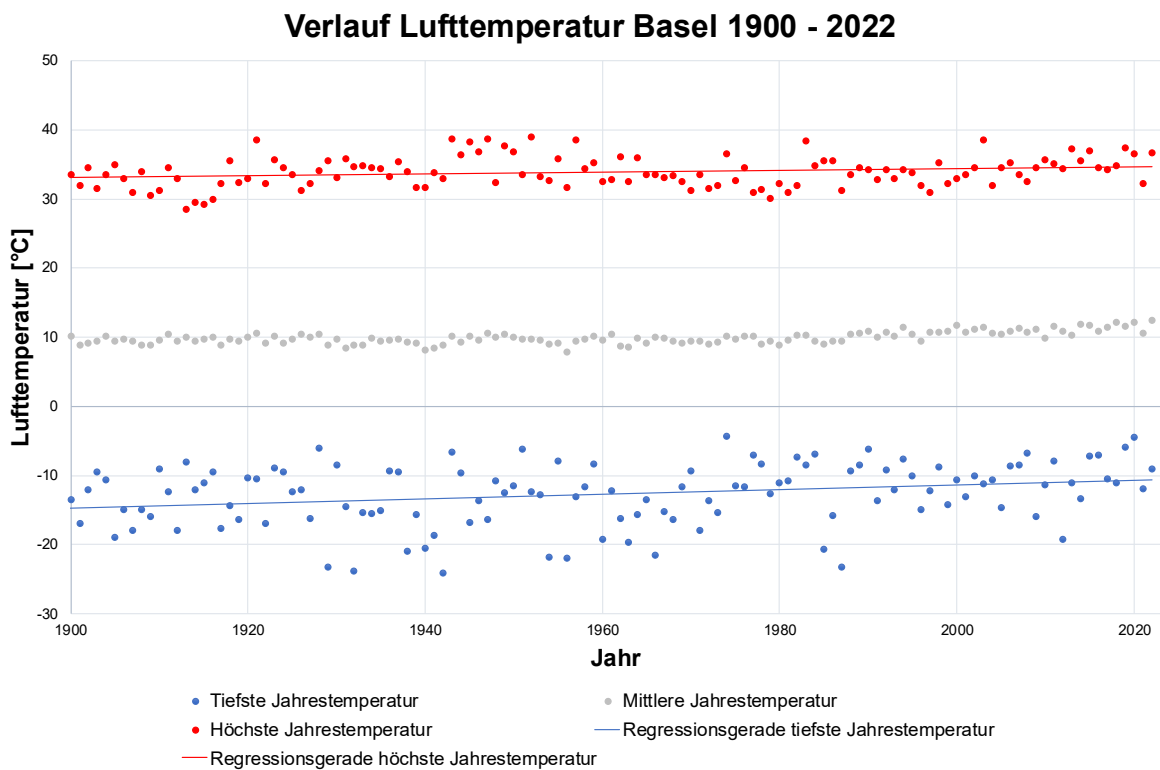


Abbildung 4: Lufttemperaturverlauf Basel von 1900 bis 2022

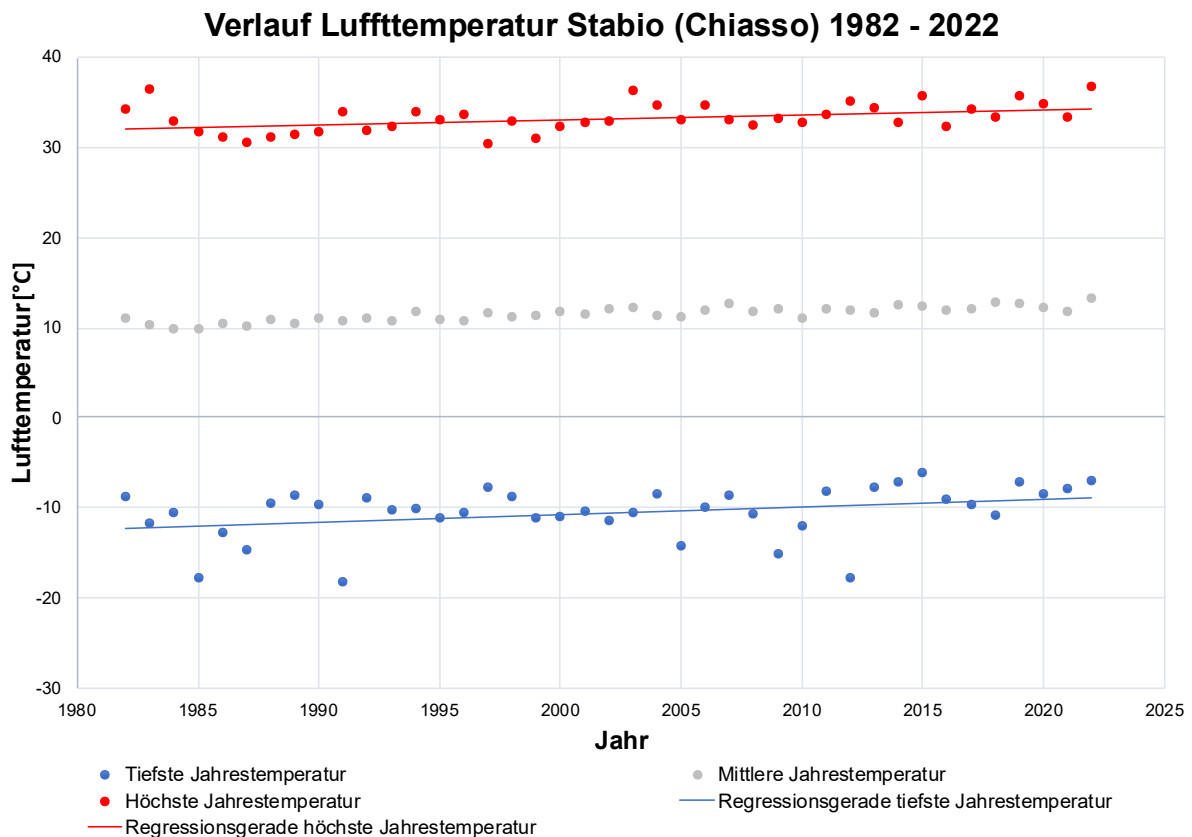


Abbildung 5: Lufttemperaturverlauf Stabio 1982 bis 2022

Vor dem Hintergrund der steigenden Lufttemperaturen in der Vergangenheit stehen folgende Fragen im Raum:

- Seit wann werden in der Schweiz lückenlose Normalspurgleise gebaut?
- Wie sieht der historische Verlauf zur Vorgabe der Neutralisationstemperatur aus?

Zur Beantwortung dieser Fragen waren ehemalige Regelwerke und Vorschriften von grossem Interesse. Aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung gestaltete sich das Auffinden von historischen Dokumenten als erschwert. Viele Dokumente gingen im Zuge der Digitalisierung verloren, resp. wurden entsorgt. Über verschiedene Wege (Nachfrage bei älteren SBB-Mitarbeitern, welche schon lange bei der SBB arbeiten, über Anfrage an bereits pensionierte SBB-Mitarbeiter, mittels Durchsuchens etlicher SBB-Archive und Nachforschen bei SBB-Historic) konnten schlussendlich viele der ehemaligen Regelwerke zum Thema Bau des (lückenlosen) Gleises gesichtet werden. Dabei stellte sich heraus, dass in der Schweiz ab 1961 lückenlose Gleise mit durchgängig verschweissten Schienen über eine Länge von mehr als 36 m gebaut werden. Diese Weiterentwicklung liegt der Stahlknappheit während des 2. Weltkriegs zugrunde. Aufgrund der schlechten Verfügbarkeit von Stahl konnten weniger Stahllaschen für den Bau von verlaschten Gleisen produziert werden, weshalb sukzessive auf das elektrische Verschweissen von Kurzschienen, zu Beginn zu einer Schienenlänge von ≤ 36 m und ab 1961 dann > 36 m, gesetzt wurde.

Gemäss Vorgaben zur Neutralisationstemperatur in historischen Regelungen, war diese in Vergangenheit wie folgt definiert:

- 1961 – 1967: Alle Gleise 23 +/- 5°C
- 1967 – 2019: Hauptgleise Alpensüdseite 28 +/- 3°C
Nebengleise Alpensüdseite 28 +/- 6°C
Hauptgleise Alpennordseite 25 +/- 3°C
Nebengleise Alpennordseite 22 +/- 6°C
- 2019 – heute: Alle Gleise Alpensüdseite 28 +/- 3°C
Alle Gleise Alpennordseite 25 +/- 3°C

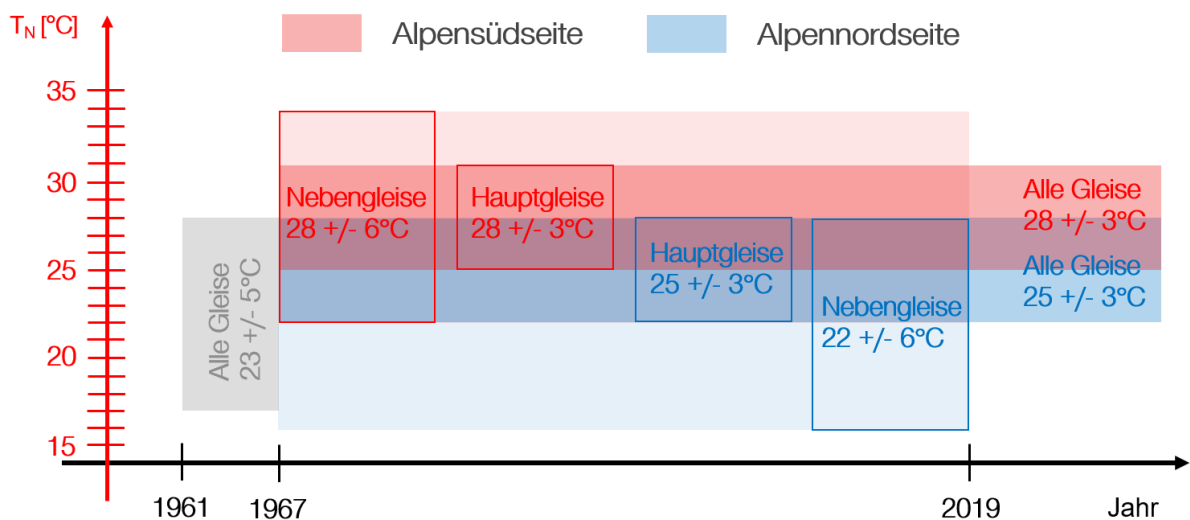


Abbildung 6: Historischer Verlauf der Neutralisationstemperatur in der Schweiz

Aus der Darstellung in Abbildung 6 wird ersichtlich, dass ab 1967 erstmalig unterschiedliche Neutralisationstemperaturen auf der Alpennord- und Alpensüdseite (Wechsel bei Betriebspunkt Biasca) vorgeschrieben waren. In der Zeit zwischen 1967 bis heute wurde an dieser unterschiedlichen Vorgabe festgehalten. In derselben Zeit gab es aber immer wieder Veränderungen bei der Definition von Haupt- und Nebengleis (heute Zug- und Rangiergleis). Es kann deshalb vorkommen, dass ein heutiges bestehendes Hauptgleis beim Bau zu einer früheren Zeit in einer Nebengleiskategorie war und deshalb theoretisch bei minimal 16°C neutralisiert wurde (Beispiel Nebengleis Alpennordseite). Unter den heutigen klimatischen Bedingungen wäre es möglich, dass ein solches Gleis während sommerlicher Hitze zu Deformationen neigen würde. Die erste Zeit des Baus von lückenlosen Gleisen von 1961 bis 1967 wird für die weitere Untersuchung nicht beachtet. Die Vorgaben aus diesen sechs Jahren wurden im Jahr 1967 geändert. Die Vermutung liegt nahe, dass Gleislagprobleme aufgetreten sind und deshalb eine Anpassung der Vorgaben angezeigt war. Die Vorgaben für die Neutralisationstemperatur folgten nicht den Verläufen der historischen Lufttemperaturen (Minimal-, Maximal- und Durchschnittswerte): Während die Lufttemperatur seit 1967 stetig angestiegen ist, erfolgten bezüglich der Neutralisationstemperatur in derselben Zeitperiode keine massgebenden Anpassungen mehr.

6 Ermittlung der maximalen Schienentemperatur

6.1 Gleistest mit Schienentemperaturmessungen

Zwischen 2023 und 2025 wurde im Netz der SBB an sieben Standorten mit eher hohen sommerlichen Lufttemperaturen ein Gleistest zur Ermittlung von Schienen-, Schottertemperaturen und Lufttemperaturen im Gleis zwei Meter über Boden durchgeführt. Die Installation der Messmittel, die Überwachung des Versuchs sowie die Berichterstattung als Abschluss erfolgte durch InfraMT GmbH. Der vollständige Bericht des Gleistests befindet sich im Anhang dieses Abschlussberichts zum Gesamtprojekt.

6.1.1 Übersicht

Ziel des Gleistests war die Herleitung von Funktionen zur Berechnung der maximalen Schienentemperaturen an Tagen mit hohen Lufttemperaturen unter Berücksichtigung der Exponierung des Gleises. Ebenso sollte untersucht werden, ob sommerliche Hitzeperioden einen Einfluss auf die Tageshöchstwerte der Schienentemperatur haben, also dass nächtliche Restwärme im Schotterbett dazu führt, dass die darüberliegenden Schienen von Tag zu Tag mehr erwärmt werden. Der Sensor zur Ermittlung der Lufttemperatur sollte dazu dienen, Vergleiche der Lufttemperatur im Gleisbereich mit in der Nähe liegenden offiziellen Messstationen des Bundes machen zu können.

Nachfolgende Standorte wurden für die Gleistests gewählt:

- Thurbrücke Ossingen, Gleis 516, km 17.300, Schienenexponierung Ost-Südost (OSO)
- Pratteln-Frenkendorf, Gleis 109, km 10.710, Schienenexponierung West-Südwest (WSW)
- Basel SBB, Weiche 333, km 0.500, Schienenexponierung Süd-Südwest (SSW)
- St. German-Visp, Gleis 114, km 133.650, Schienenexponierung Süd-Südwest (SSW)
- Chiasso, Gleis 563, km 205.800, Schienenexponierung Süd-Südwest (SSW)
- Lugano Vedeggio, Gleis 508, km 7.880, Schienenexponierung West-Südwest (WSW)
- Luzern Verkehrshaus-Meggen, Gleis 375, km 175.700, Schienenexponierung West-Südwest (WSW)

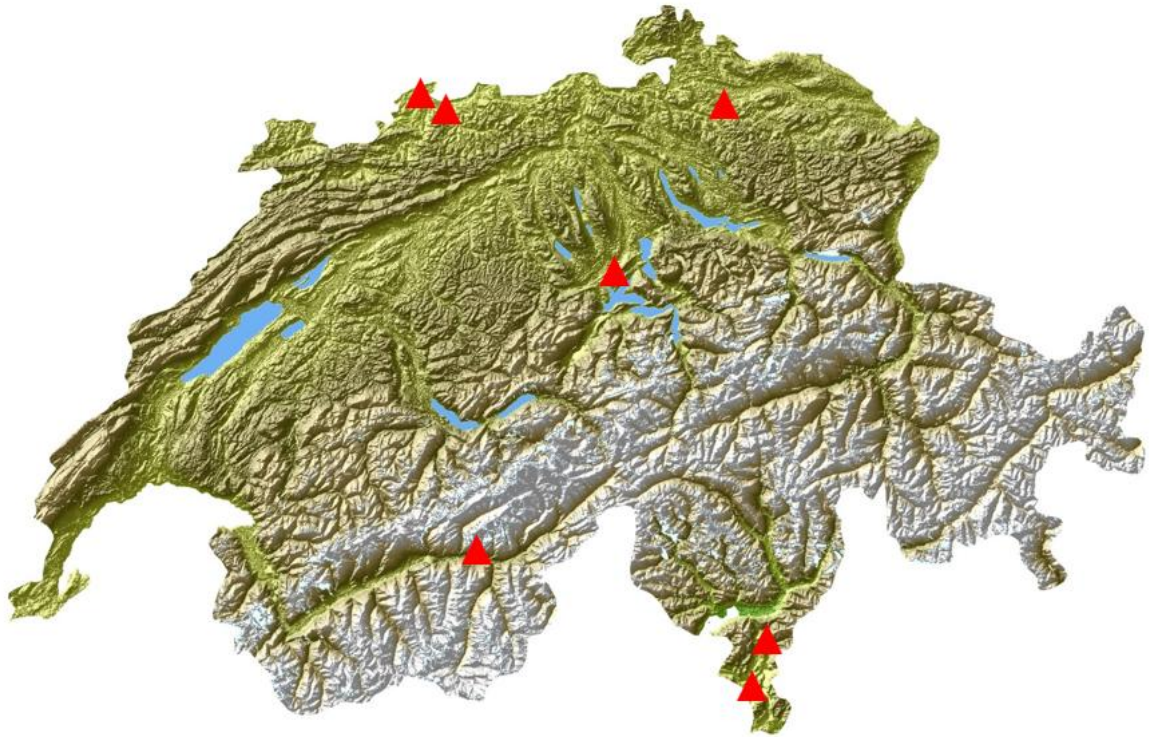


Abbildung 7: Karte Messstandorte Schienentemperaturen

6.1.2 Messkonzept Gleistest permanente Temperaturmessung

Das Messkonzept wurde folgendermassen aufgebaut:

Pro Standort wurden insgesamt fünf PT100-Sensoren verbaut. Zwei Stück an der Schiene (Sensor 3 und 4, Schienenfuss und Schienensteg), zwei Stück im Schotter (Sensor 1 und 2, Mitte Schotterbett und an Planum) und ein Sensor zur Messung der Lufttemperatur zwei Meter m ab Boden neben dem Gleis (Sensor 5, ausserhalb des Lichttraumprofils der Fahrbahn). Beim Testgleis in Chiasso wurde zur Verifizierung der Messdaten der Schienentemperatur und zum Vergleich der Temperaturunterschiede an der Schiene an unterschiedlichen Messorten eine ein Meter lange Referenzschiene in derselben Ausrichtung wie die Schiene im Gleis neben das Gleis gelegt und mit fünf Temperatursensoren bestückt (Sensoren 6 bis 10).

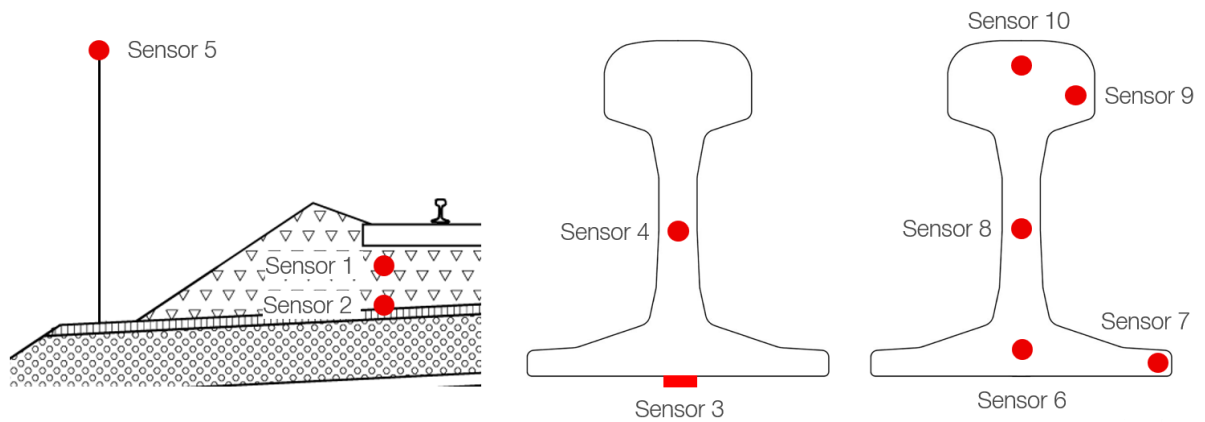


Abbildung 8: Messkonzept Gleistest

6.1.3 Messergebnisse

In den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 9, Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14, Abbildung 15) sind die maximal erreichten Schienentemperaturen an sonnigen Tagen bei unterschiedlichen Tagesmaxima der Lufttemperaturen ersichtlich. In den Diagrammen beziehen sich die Lufttemperaturwerte auf Messungen des Sensors 5 (Lufttemperatur zwei Meter ab Boden) reduziert um 2.4 °C. Dieser Korrekturwert entspricht dem durchschnittlichen Unterschied zwischen den maximalen Temperaturen der Wetterstationen und jenen an den Messstandorten. Im Mittel sind die Temperaturen an den Messstandorten also rund 2.4 °C höher als an den benachbarten Wetterstationen. Die in den Diagrammen dargestellten Lufttemperaturen decken sich in grobem Vergleich gut mit den 500 x 500 m Messrastern von meteoblue AG für die Ermittlung der Lufttemperaturen im Bereich der Bahngleise.

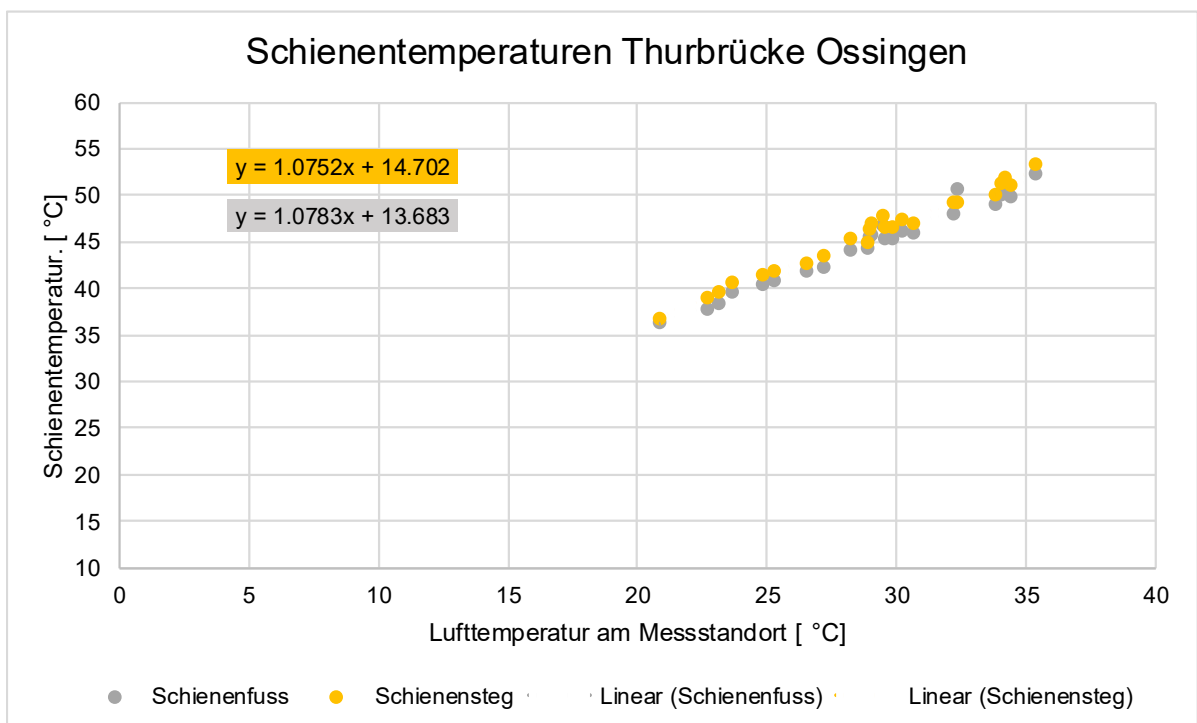


Abbildung 9: Maximale Tagestemperaturen der Schienen auf Thurbrücke Ossingen

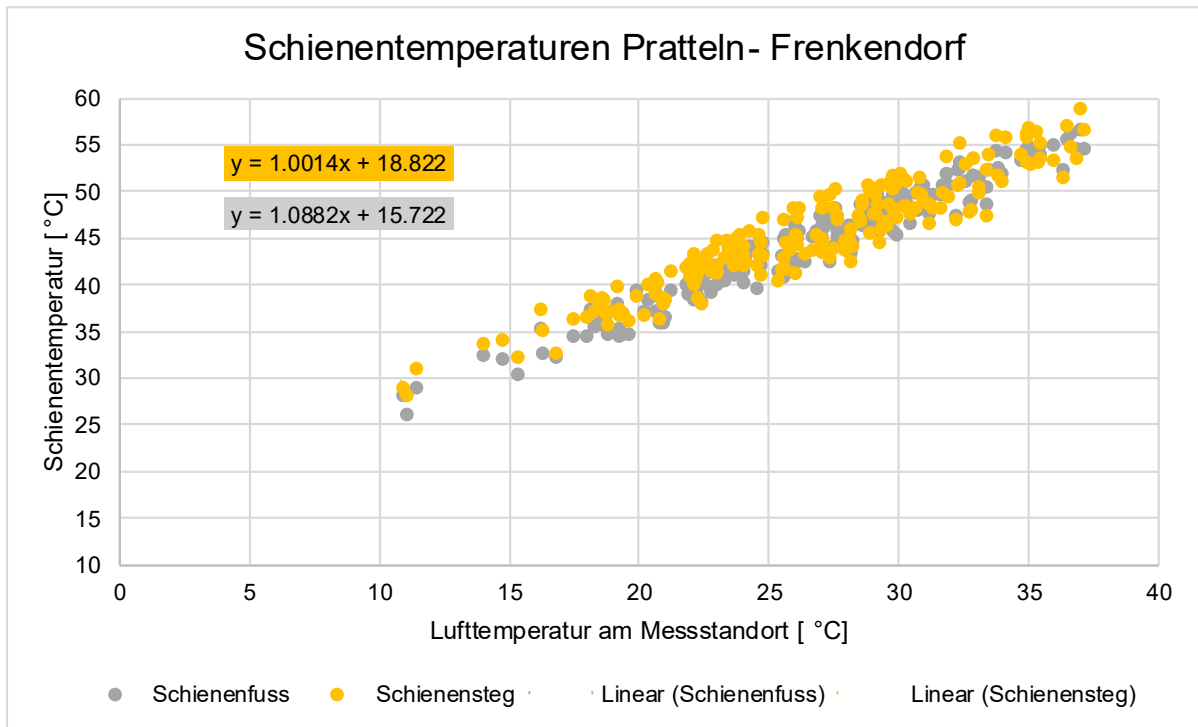


Abbildung 10: Maximale Tagestemperaturen der Schienen zwischen Pratteln und Frenkendorf

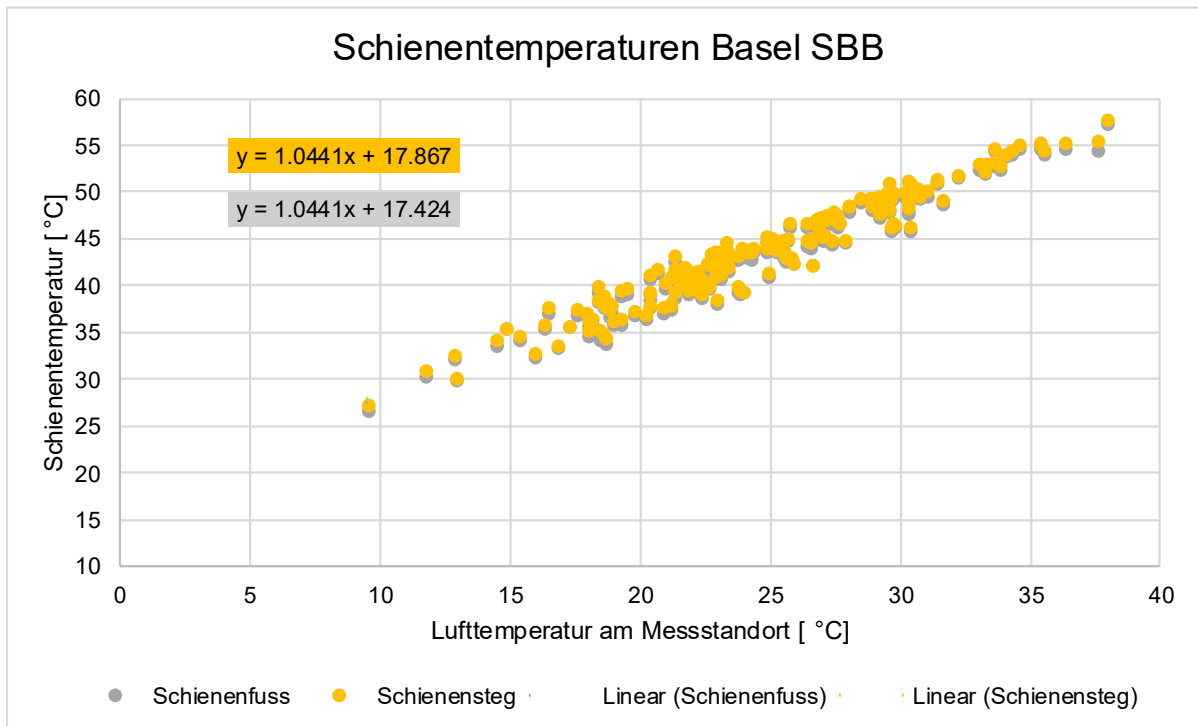


Abbildung 11: Maximale Tagestemperaturen der Schienen in Basel

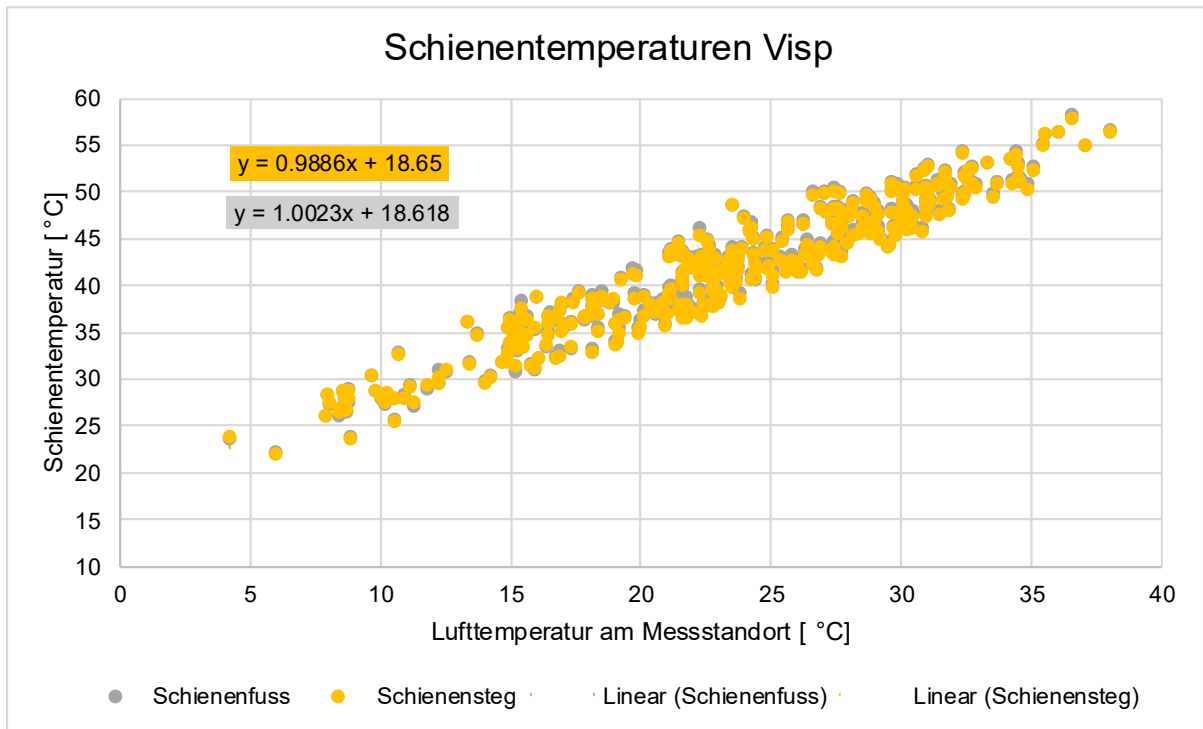


Abbildung 12: Maximale Tagestemperaturen der Schienen in Visp

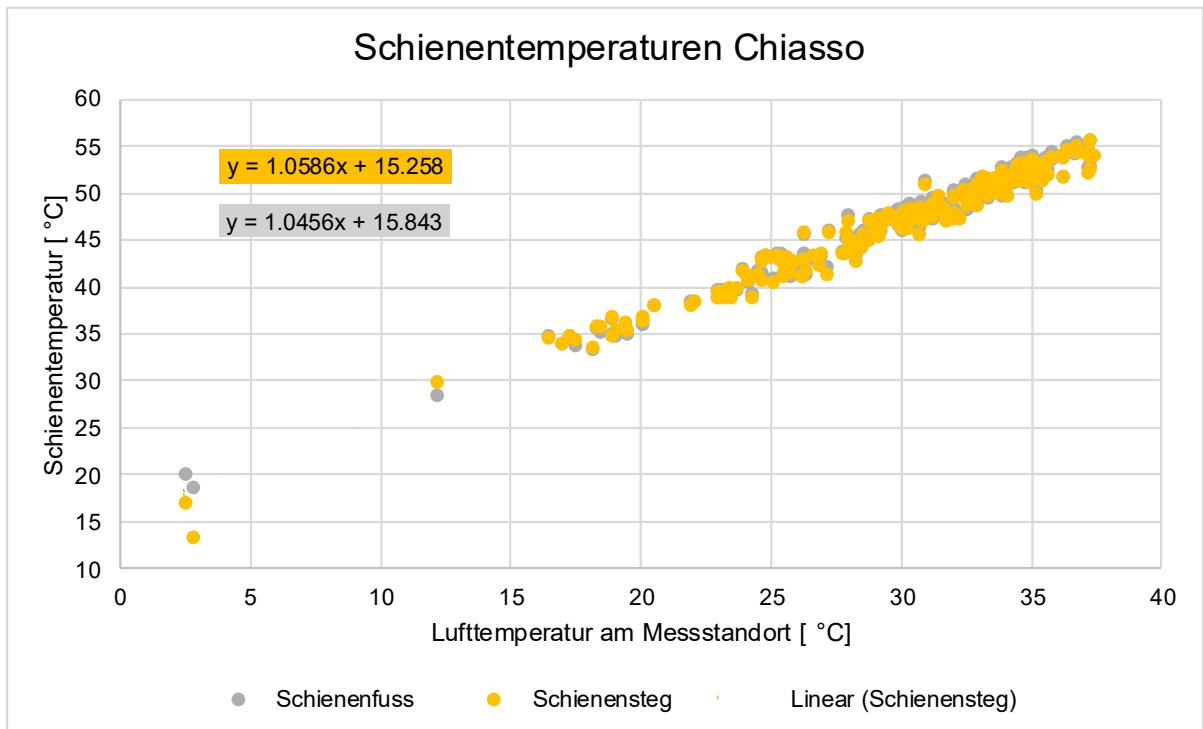


Abbildung 13: Maximale Tagestemperaturen der Schienen in Chiasso

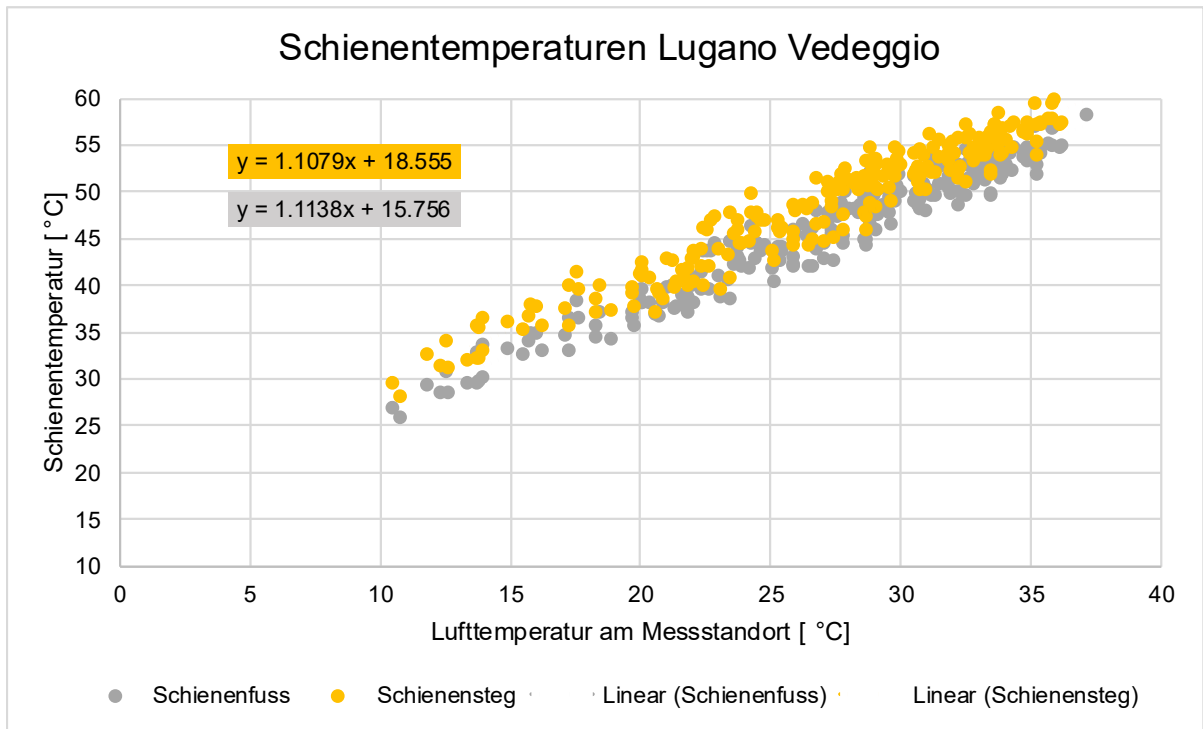


Abbildung 14: Maximale Tagestemperaturen der Schienen in Lugano Vedeggio

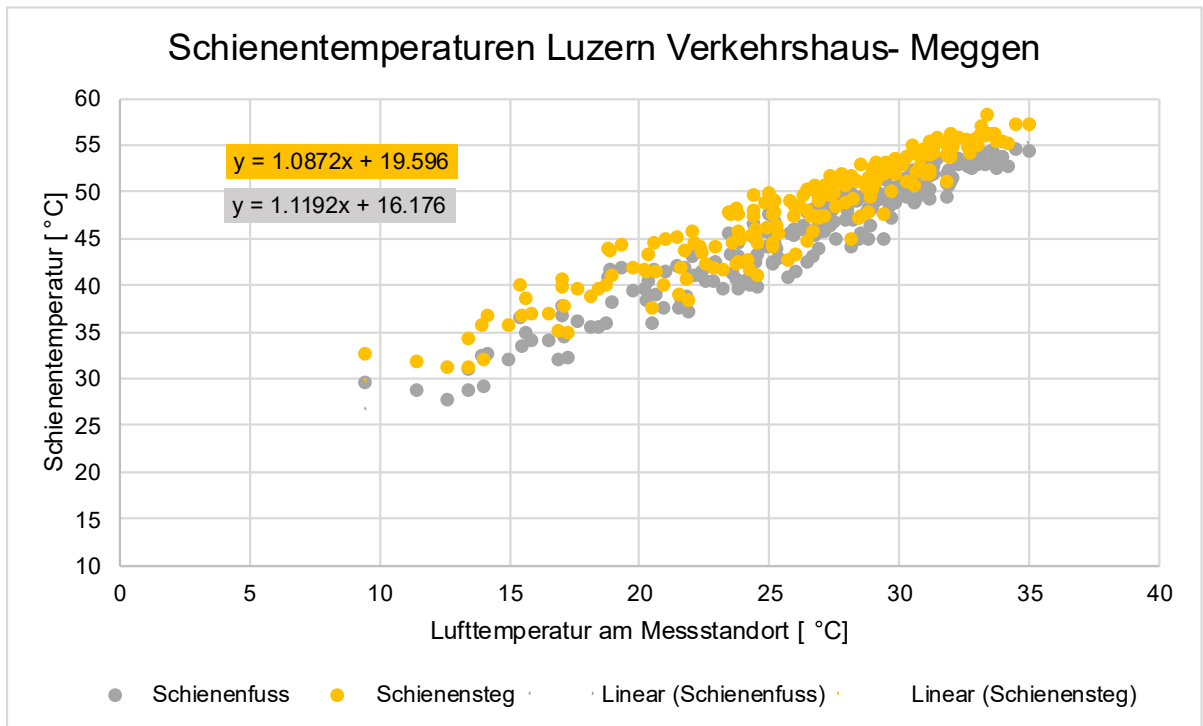


Abbildung 15: Maximale Tagestemperaturen der Schienen zwischen Luzern Verkehrshaus und Meggen

Bei Betrachtung aller Diagramme der jeweils höchsten Schienen- und Lufttemperaturen an sonnigen Tagen fällt auf, dass die Funktion für die maximale Schienentemperatur bei unterschiedlichen maximalen Tageslufttemperaturen linear verläuft. Diese Ausgangslage ermöglicht prognostische Aussagen, welche Schienentemperaturen bei gegenwärtigen, aber auch zukünftigen, maximalen Lufttemperaturen erreicht werden können.

6.2 Manuelle Schienentemperaturmessungen im Gleis

6.2.1 Messkonzept

Die Schienentemperaturen wurden im Viertelstundetakt auf der schattigen Schienenseite in der Mitte des Schienenstegs gemessen (gem. R RTE 22041, Kap. 6.4). Für die Temperaturermittlung wurde ein Infrarot-Temperaturmessgerät Fluke 62 Max verwendet (Messbereich -30 bis +500 °C, Genauigkeit ± 1.5 °C oder $\pm 1.5\%$ des Messwerts). Der Emissionsgrad wurde auf 0.95 eingestellt. Die in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführten Temperaturwerte an den Schienen sind Mittelwerte aus mindestens fünf Einzelmessungen.



Abbildung 16: Fluke 62 Max für Schienentemperaturmessungen von Hand im Gleis

Alle Messungen erfolgten nur an komplett wolkenlosen Hitzetagen ($T_{\text{Luft}} \geq 30^\circ\text{C}$). Die Messungen in Allaman und Coppet sollten neben der Ermittlung der maximalen Schienentemperatur an einem Hitzetag noch dazu dienen, Vergleiche zwischen Schienentemperaturen an der Stockschiene von Weichen mit den Schienentemperaturen im angrenzenden Gleis machen zu können. Grund dafür ist, dass pro Weichenheizkreis jeweils eine Weiche am Schienenfuss der Stockschiene (einige Meter von der Zungenspitze entfernt) mit einem Temperaturfühler ausgestattet ist. Dieser dient zur Steuerung der Weichenheizungen in einem Weichenheizkreis. Vergleiche von Temperaturdaten von unterschiedlichen Weichenheizkreisen am selben Betriebspunkt und in derselben Schienenexposition haben allerdings aufgezeigt, dass die gemessenen Schienentemperaturen bis zu 5°C auseinander liegen. Mit dem vorliegenden Vergleich soll der Grund für diese Unterschiede untersucht werden.

6.2.2 Testorte und Messergebnisse

Münchenstein Gleis 11

Datum: 25.06.2025

Ort: Dornach-Münchenstein, Gleis 11, km 117.530

Oberbau: EN 54E2 Schienen, Zweiblock Betonschwellen.

Exponierung der Schienen: Ost-Südost

Wetter: wolkenlos, kein Wind

Lufttemperaturen agrometeo.ch, Station in Aesch BL

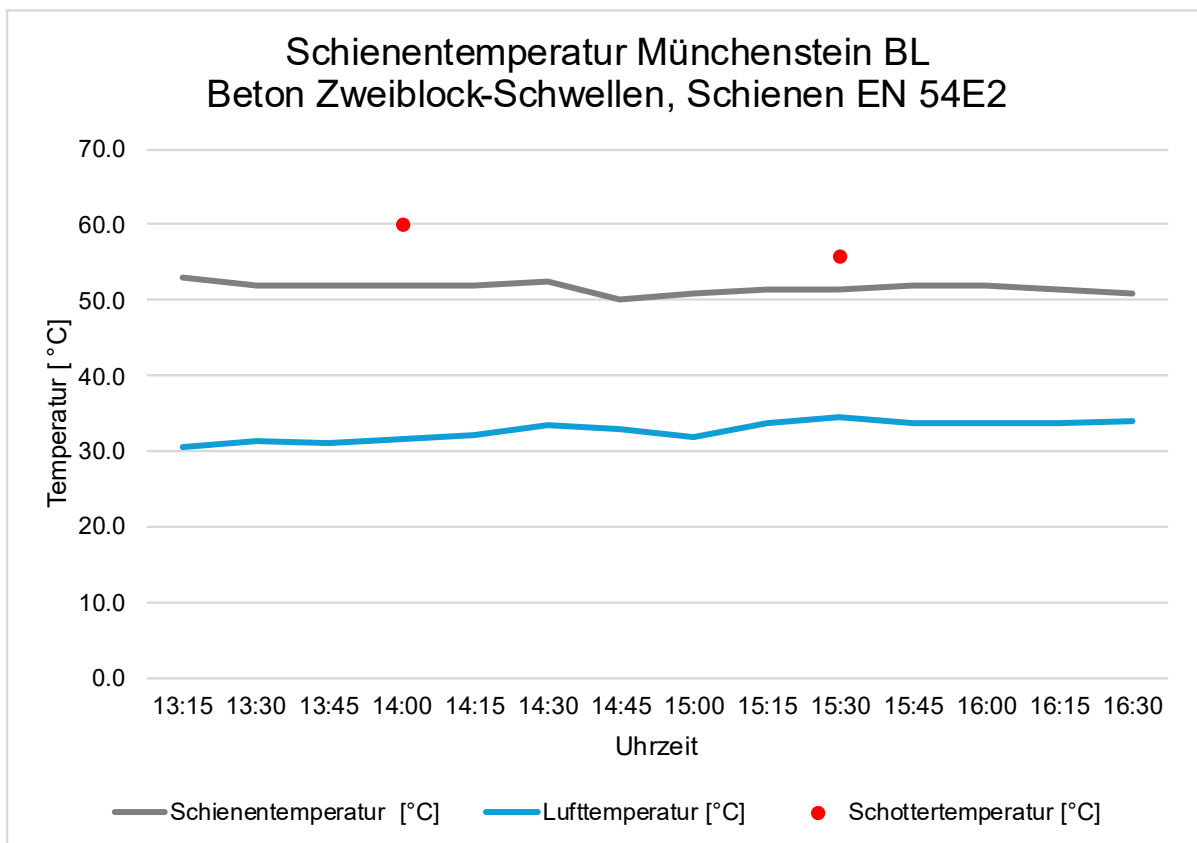
Tageshöchsttemperatur bei 35.6 Grad um 18:30 Uhr.



Abbildung 17: Situation Schienentemperaturmessungen Münchenstein

Tabelle 1: Messdaten Schienentemperatur Münchenstein

Zeit [hh:mm]	Lufttemperatur [°C]	Schienentemperatur [°C]	Schottertemperatur [°C]	ΔT Schiene-Luft [°C]
13:15	30.5	53.0		22.5
13:30	31.2	52.0		20.8
13:45	31.0	52.0		21.0
14:00	31.6	52.0	60.0	20.4
14:15	32.2	52.0		19.8
14:30	33.5	52.5		19.0
14:45	33.0	50.0		17.0
15:00	31.9	51.0		19.1
15:15	33.6	51.5		17.9
15:30	34.4	51.5	56.0	17.1
15:45	33.7	52.0		18.3
16:00	33.6	52.0		18.4
16:15	33.6	51.5		17.9
16:30	33.9	51.0		17.1


Abbildung 18: Diagramm Temperaturverläufe Münchenstein
Coppet Weiche 402

Datum: 12.08.2025

Ort: COP, Weiche 402, Gleisabschnitt zwischen Weiche 402 und 404

Oberbau: Schienenprofil EN 60E2, Betonschwellen.

Exponierung der Schienen: Ost-Südost

Wetter: wolkenlos, zeitweise leichter Wind.

Vergleich Messungen an Schiene ausserhalb der Weiche in Richtung Genf und an Stockschiene innerhalb der Weiche bei Temperaturfühler WHK.

Um 14:30 Uhr steht die Sonne genau über der Schiene (Schattenwurf beide Schienenseiten identisch).

Lufttemperaturen agrometeo.ch, Mittelwert aus zwei Stationen in Tannay und Founex
Tageshöchsttemperatur bei 32.6 Grad um 18:10 Uhr.

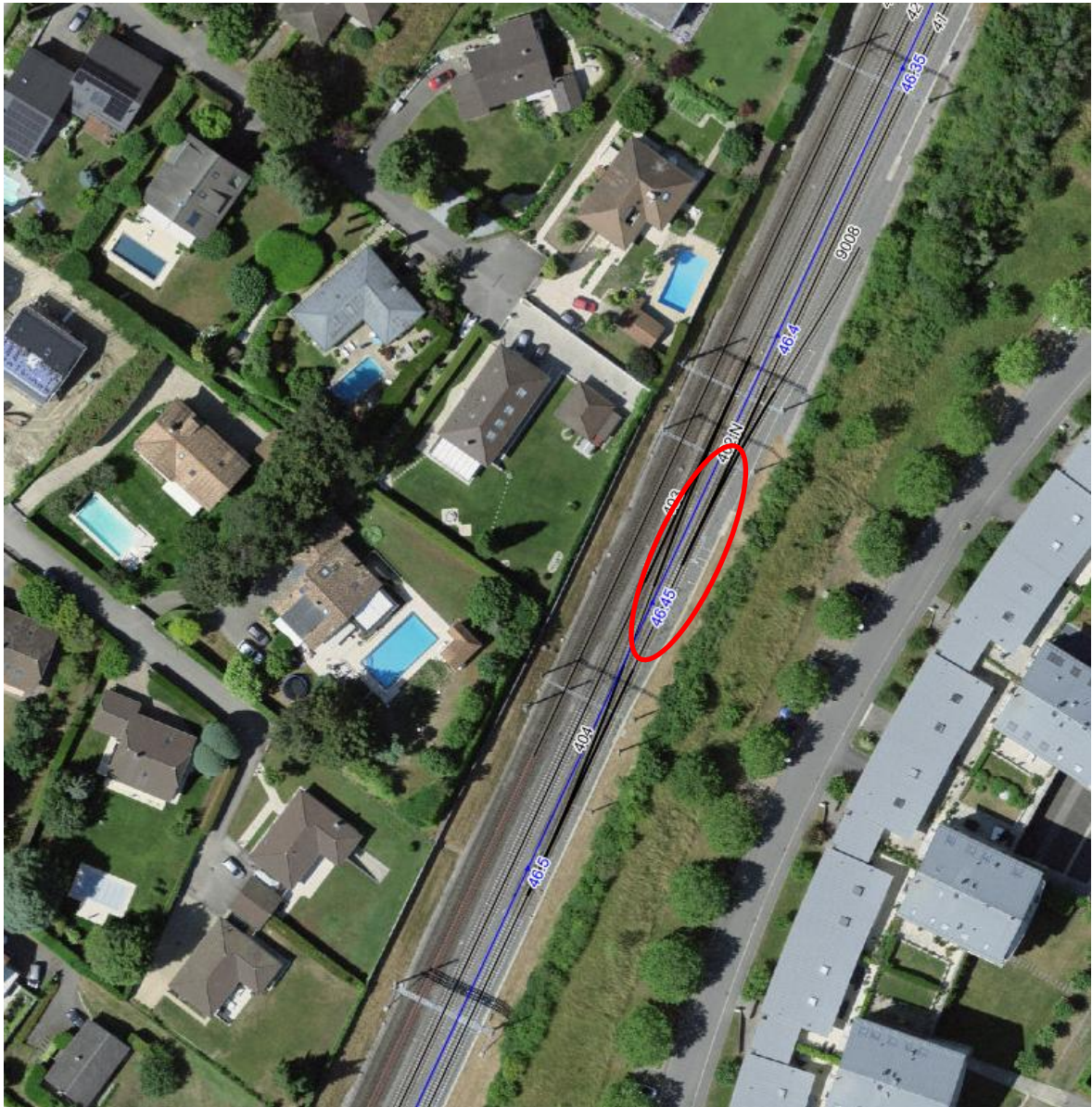
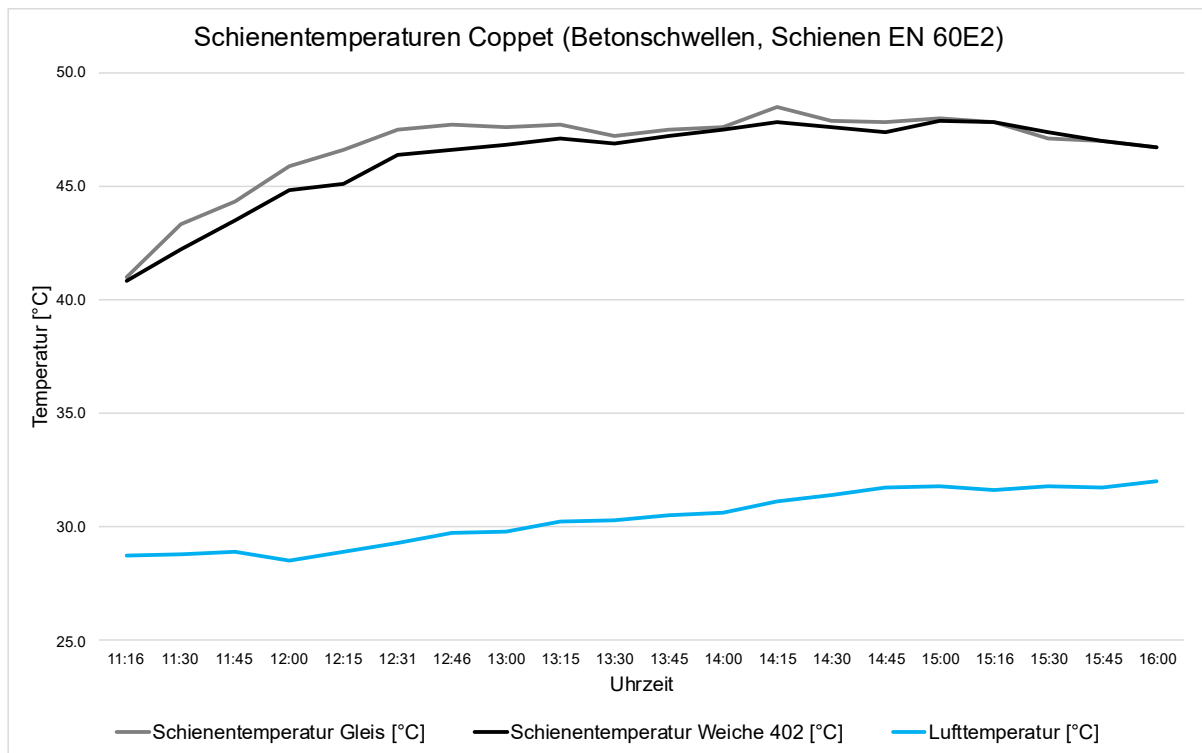


Abbildung 19: Situation Schienentemperaturmessungen Coppet

Tabelle 2: Messdaten Schienentemperatur Coppet

Zeit [hh:mm]	Lufttemperatur [°C]	Schienentemperatur Gleis [°C]	Schienentemperatur Weiche 402 [°C]	ΔT Schiene-Luft [°C]
11:16	28.7	41.0	40.8	12.3
11:30	28.8	43.3	42.2	14.5
11:45	28.9	44.3	43.5	15.4
12:00	28.5	45.9	44.8	17.4
12:15	28.9	46.6	45.1	17.7
12:31	29.3	47.5	46.4	18.2
12:46	29.7	47.7	46.6	18.0
13:00	29.8	47.6	46.8	17.8
13:15	30.2	47.7	47.1	17.5
13:30	30.3	47.2	46.9	16.9
13:45	30.5	47.5	47.2	17.0
14:00	30.6	47.6	47.5	17.0
14:15	31.1	48.5	47.8	17.4
14:30	31.4	47.9	47.6	16.5
14:45	31.7	47.8	47.4	16.1
15:00	31.8	48.0	47.9	16.2
15:16	31.6	47.8	47.8	16.2
15:30	31.8	47.1	47.4	15.3
15:45	31.7	47.0	47.0	15.3
16:00	32.0	46.7	46.7	14.7


Abbildung 20: Diagramm Temperaturverläufe Coppet

Rheinfelden Gleis F7 und 75

Datum: 29.06.2025

Ort: Rheinfelden, Gleis F7, km 72.000 und Gleis 75, km 72.170

Oberbau: Stahlschwellen, Schienen EN 46E1 und Holzschwellen, Schienen EN 54E2

Exponierung Schienen: Süd-Südost

Wetter: wolkenlos, zeitweise leichter Wind

Vergleich Messungen an Schiene in Stahlwellengleis EN 46E1 und Holzschwellengleis EN 54E2 mit gleicher Exponierung und blanker Fahrspiegel auf Schienenkopf.

Lufttemperaturen agrometeo.ch, Station in Wallbach

Tageshöchsttemperatur bei 33.9 Grad um 17:10 Uhr.

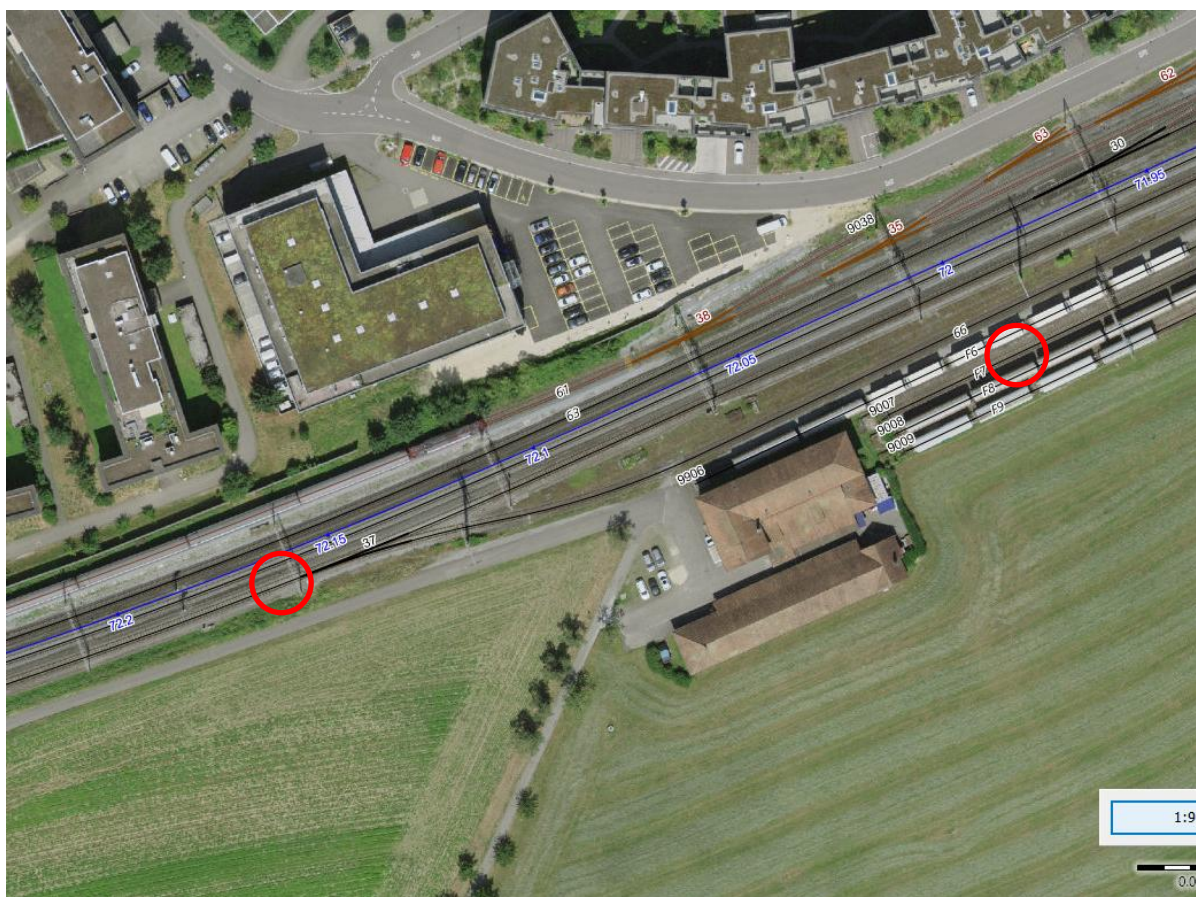
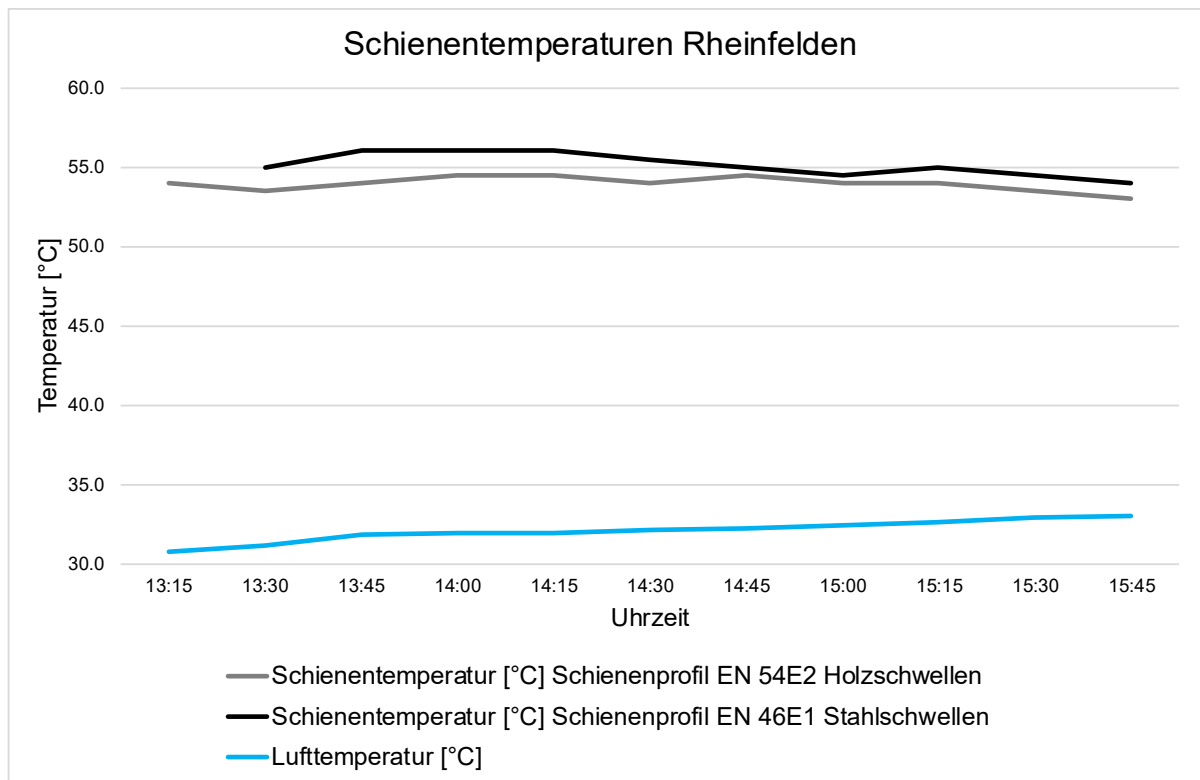


Abbildung 21: Situation Schienentemperaturmessungen Rheinfelden

Tabelle 3: Messdaten Schienentemperatur Rheinfelden

Zeit [hh:mm]	Lufttemperatur [°C]	Schienentemperatur [°C] Schienenprofil EN 54E2 Holzschwellen	Schienentemperatur [°C] Schienenprofil EN 46E1 Stahlschwellen
13:15	30.8	54.0	
13:30	31.1	53.5	55.0
13:45	31.8	54.0	56.0
14:00	31.9	54.5	56.0
14:15	31.9	54.5	56.0
14:30	32.1	54.0	55.5
14:45	32.2	54.5	55.0
15:00	32.4	54.0	54.5
15:15	32.6	54.0	55.0
15:30	32.9	53.5	54.5
15:45	33.0	53.0	54.0


Abbildung 22: Diagramm Temperaturverläufe Rheinfelden

Allaman Weiche 1 und Gleis 21

Datum: 11.08.2025

Ort: Allaman, Weiche 1 und Gleis 21, km 21.180

Oberbau: Schienenprofil EN 60E2, Betonschwellen.

Exponierung Schienen: Süd-Südost

Wetter: wolkenlos, zeitweise leichter Wind.

Vergleich Messungen an Schiene ausserhalb der Weiche in Richtung Lausanne und an Stockschiene innerhalb der Weiche bei Temperaturfühler WHK.

Lufttemperaturen agrometeo.ch, Station in Aubonne

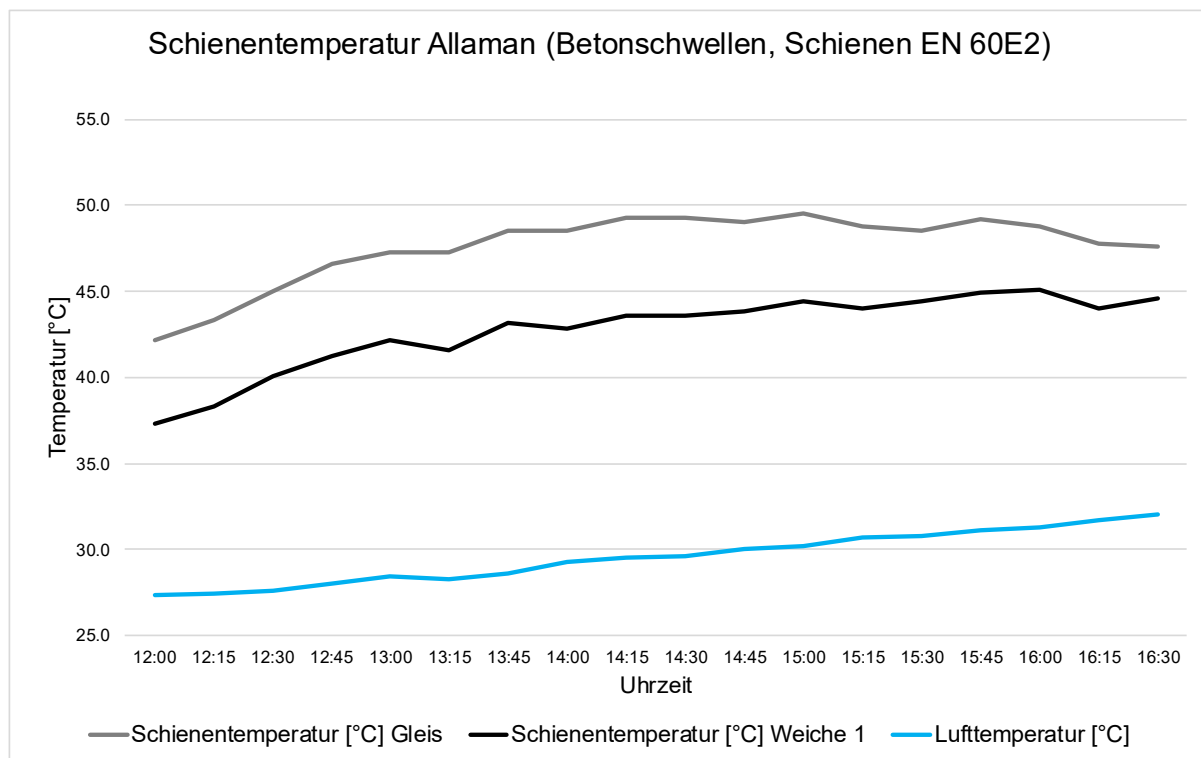
Tageshöchsttemperatur bei 32.3 Grad um 17:20 Uhr.



Abbildung 23: Situation Schienentemperaturmessungen Allaman

Tabelle 4: Messdaten Schienentemperatur Allaman

Zeit [hh:mm]	Lufttemperatur [°C]	Schienentemperatur [°C] Gleis	Schienentemperatur [°C] Weiche 1
12:00	27.3	42.2	37.3
12:15	27.4	43.3	38.3
12:30	27.6	45.0	40.1
12:45	28.0	46.6	41.2
13:00	28.4	47.3	42.2
13:15	28.3	47.3	41.6
13:45	28.6	48.5	43.2
14:00	29.3	48.5	42.8
14:15	29.5	49.3	43.6
14:30	29.6	49.3	43.6
14:45	30.0	49.0	43.8
15:00	30.2	49.5	44.4
15:15	30.7	48.8	44.0
15:30	30.8	48.5	44.4
15:45	31.1	49.2	44.9
16:00	31.3	48.8	45.1
16:15	31.7	47.8	44.0
16:30	32.0	47.6	44.6


Abbildung 24: Diagramm Temperaturverläufe Allaman

6.2.3 Temperaturvergleich unterschiedlicher Schienenprofile

In Rheinfelden wurde neben dem Vergleich des Temperaturverlaufs einer EN 46E1- und einer EN 54E2-Schiene auch eine Einmalmessung an einer EN 60E2-Schiene im Hauptgleis (Gleis 74, km 72.170) mit derselben Schienenexponierung wie die anderen beiden Gleise durchgeführt. Das Ergebnis aus dem Vergleich sieht wie folgt aus:

Tabelle 5: Vergleich der Temperaturen unterschiedlicher Schienenprofile

Zeit [hh:mm]	Lufttemperatur [°C] aktuell	Schientemperatur [°C] Schienenprofil EN 54E2 Holzschwellen	Schientemperatur [°C] Schienenprofil EN 46E1 Stahlschwellen	Schientemperatur [°C] Schienenprofil EN 60E2 Betonschwellen
14:45	32.2	54.5	55.0	52.0

Die Fahrspiegelbreiten und -zustände (vgl. Abbildung 25 und Abbildung 26) der beiden grösseren Schienenprofile EN 54E2 und EN 60E2 waren vergleichbar, diejenige des kleinsten Schienenprofils EN 46E1 (Abbildung 27) (war wesentlich breiter (über den gesamten Schienenkopf → flacher Schienenkopf aufgrund fehlenden Unterhalts).



Abbildung 25: EN 54E2 Schiene Gleis 75 mit normalem Fahrspiegel



Abbildung 26: EN 60E2 Schiene Gleis 74 mit normalem Fahrspiegel



Abbildung 27: EN 46E1 Schiene Gleis F7 mit breitem Fahrspiegel

Breitere Fahrspiegel haben einen Einfluss auf die Erwärmung der Schiene durch die Sonne (siehe Kap. 6.2.4). Für den hier beschriebenen Fall bedeutet das, dass die Temperatur in der EN 46E1-Schiene vermutlich noch höher wäre, wenn der Fahrspiegel vergleichbar mit jenem der zwei grösseren Schienen wäre.

Anhand der Messergebnisse in Tabelle 5 wird ersichtlich, dass bei identischer Sonneneinstrahlung ein kleines Schienenprofil heisser wird als ein grosses Schienenprofil.

Folgende physikalischen Gesetze und Eigenschaften begründen diese Aussage:

1. Geringere Wärmekapazität

Ein kleines Profil hat weniger Masse, demzufolge es hat es eine geringere Wärmekapazität.

Das bedeutet:

- Es braucht weniger Energie, um seine Temperatur zu erhöhen.
- Bei gleicher eingestrahelter Sonnenenergie (z. B. pro Meter) steigt die Temperatur des kleinen Profils schneller.

1. Gleich viel Energie, weniger Material

Die Sonneneinstrahlung trifft auf eine bestimmte Fläche.

- Ein kleines und ein grosses Profil könnten ähnlich grosse bestrahlte Flächen haben (z. B. oben liegende Fläche zur Sonne).
- Aber: Das Volumen (also die Masse) ist beim kleinen Profil geringer, d. h. die gleiche Energiemenge verteilt sich auf weniger Material. Das erklärt die höhere Temperatur des kleineren Schienenprofil zur selben Zeit.

2. Wärmeabgabe durch Konvektion & Strahlung

Größere Profile haben:

- Mehr Oberfläche relativ zum Volumen für Wärmeaustausch mit der Umgebung.
- Das bedeutet: Sie können mehr Wärme abgeben (z. B. an die Luft), d. h. sie bleiben kühler.

Welches der drei Schienenprofile EN 46E1, 54E2 und 60E2 schlussendlich für die Bestimmung der Neutralisationstemperatur in einem Schweizer Bahnnetz massgebend ist, wird in Kap. 6.3 behandelt.

6.2.4 Erläuterung der Temperaturdifferenz zwischen Streckengleis und Stockschiene

Die in Kapitel 6.2.1 beschriebene Temperaturdifferenz zwischen der mit einem Temperaturfühler des Weichenheizkreises ausgestatteten Stockschiene und der angrenzenden Schiene des Streckengleises ist nachvollziehbar erklärbar.

Der Temperaturfühler befindet sich im Bereich der halben Zungenvorrichtung. Abhängig von der jeweiligen Exposition der Weiche wird die Stockschiene – und damit der Einbauort des Temperaturfühlers – durch die benachbarte Zunge teilweise verschattet. Diese Verschattung reduziert die solare Einstrahlung und führt infolgedessen zu einer geringeren Erwärmung bzw. zu einer relativen Abkühlung der Stockschiene gegenüber der freiliegenden Streckengleisschiene.

6.2.5 Weitere Feststellungen

Gleich im Anschluss an das Gleis 75 (54E2 Schiene mit manueller Temperaturmessung) in Rheinfelden liegt das Gleis 66 (Rangiergleis mit sehr geringer Belastung).



Abbildung 28: Messstandorte Rheinfelden

Die beiden Gleise sind exakt genau gleich exponiert, jedoch ist der Zustand des Schienenkopfs unterschiedlich. Der Schienenkopf in Abbildung 29 weist einen breiten Fahrspiegel auf, während auf dem Schienenkopf in Abbildung 30 der Fahrspiegel schmaler ist und aufgrund der geringen Belastung noch Schleifriefen sichtbar sind, welche ebenfalls eine korrodierte Oberfläche aufweisen.

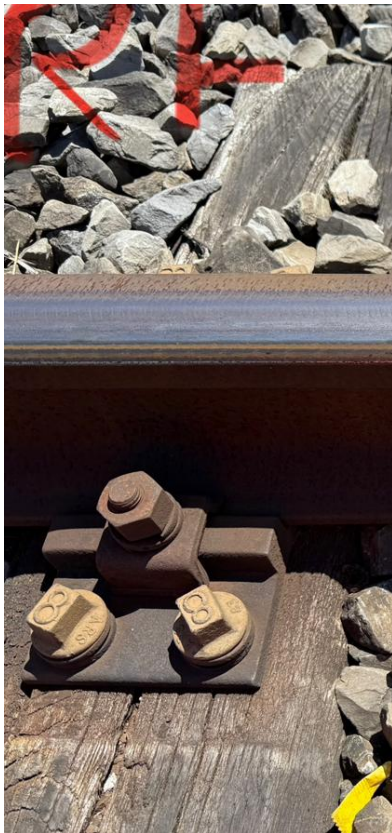


Abbildung 29: EN 54E2 Schiene Gleis 75 mit Temperaturüberwachung



Abbildung 30: EN 54E2 Schiene Gleis 66 mit einmaliger Vergleichsmessung

Die Messungen um 13:30 Uhr ergeben folgendes Resultat:

Tabelle 6: Ergebnisse der Temperaturmessungen in Gleisen 75 und 66

Zeit [hh:mm]	Lufttemperatur [°C]	Schientemperatur [°C]	Schientemperatur [°C]
		Schienenprofil EN 54E2 Gleis 75	Schienenprofil EN 54E2 Gleis 66
13:30	31.1	53.5	55.0

Die spiegelnde Oberfläche des Fahrspiegels reflektiert eine grosse Menge von Infrarotstrahlen, weshalb sich eine Schiene unter solchen Bedingungen weniger stark erwärmt wie eine andere mit sehr schmalen oder bereits korrodiertem Fahrspiegel (z. B. Rangiergleis mit sehr geringer Belastung).

Neben der Exponierung der Schienen, dem Schienenprofil sowie dem Zustand und der Grösse des Fahrspiegels haben weitere Faktoren einen Einfluss auf die maximale Schientemperatur:

- Zustand der gesamten Schienenoberfläche (Farbe, Korrosion, Struktur, ...)
- Wind
- Seenähe

6.3 Grundlagen für die Ermittlung der maximalen Schienentemperatur

Aus den Daten der Gleistests mit permanenter Überwachung der Schienentemperaturen an 7 Standorten können lineare Regressionsgeraden berechnet werden, welche die linearen Zusammenhänge zwischen den maximalen Tagestemperaturen (bei ganztägig sonnigen Wetterverhältnissen) und maximalen Schienentemperaturen beschreiben (Kap. 6.1.3). Diese linearen Zusammenhänge ermöglichen prognostischen Aussagen über die maximalen Schienentemperaturen bei zukünftigen maximalen Lufttemperaturen. Bei genauerer Betrachtung fällt allerdings auf, dass die Steigungen und y-Achsenabschnitte der linearen Funktionen sehr unterschiedlich ausfallen. Im oberen Temperaturbereich kommt es sogar zu Überschneidungen der Funktionen.

Diese Beobachtung ist ein Indiz dafür, dass neben den maximalen Lufttemperaturen weitere Faktoren eine Auswirkung auf die maximale Schienentemperaturen mitberücksichtigt werden sollen. Beispielsweise können unterschiedliche Schienenprofile unter gleichen Wetterbedingungen unterschiedlich heiss werden, wie aus den Diagrammen in Kapitel 6.1.3 und den Ergebnissen der Handmessungen in Kapitel 6.2.3 entnommen werden kann. Als Erstes muss allerdings bestimmt werden, welches Schienenprofil in Bezug auf die Gleisstabilität massgebend ist.

Nach der Formel des linear-elastischen Modells von Winkler (Winkler, 1867) können die kritische Schienenspannung N_{krit} und daraus die kritische Schienentemperatur ΔT_{krit} berechnet werden.

Kritische Normalspannung:

$$N_{\text{krit}} = 2\sqrt{EI_y k_y}$$

Kritische Schienentemperatur:

$$\Delta T_{\text{krit}} = \frac{N_{\text{krit}}}{\alpha EA}$$

Wird daraus die Sensitivität mit beliebigen Werten für die Bettungssteifigkeit k_y berechnet - Abhängig von der Oberbauart (Beton- Holz- oder Stahlschwellen) - so ergeben sich nachfolgende Sensitivitätskurven für die Schienenprofile EN 46E1, 54E2 und 60E2 (Abbildung 31):

Sensitivitätskurve: Kritische Temperaturerhöhung vs. k_y für Schienenprofile

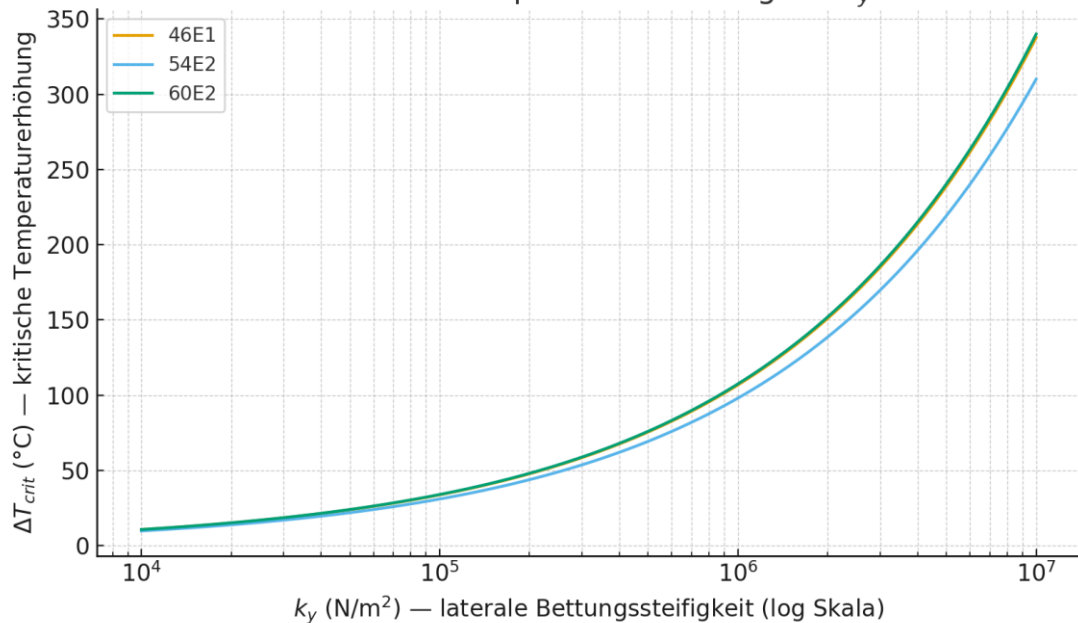


Abbildung 31: Sensitivitätskurve kritische Temperaturerhöhung vs. Bettungssteifigkeit für Schienenprofile

Aus dem Diagramm geht hervor, dass die kritischen Schientemperaturen ΔT_{krit} für die Schienenprofile EN 46E1 und 60E2 vergleichbar und höher sind als jene für das Schienenprofil EN 54E2. Bei der Herleitung von Funktionen für die Berechnung der maximalen Schientemperatur zu jeder beliebigen maximalen Tagestemperatur wird deshalb der Fokus auf das Schienenprofil EN 54E2 gelegt. Bei fehlenden Daten für das Schienenprofil EN 54E2, werden die Daten von den Schienenprofilen EN 60E2 übernommen und für das Schienenprofil EN 54E2 angepasst. Gemäss dem Vergleich der Schientemperaturen durch manuelle Messung in Kap. 6.2.3 kann eine EN 54E2 Schiene im Vergleich zur EN 60E2 Schiene bei Exposition Süd-Südost rund 2.5°C heisser werden (bei $T_{Luft} = 33.9^{\circ}\text{C}$).

Aus den Messergebnissen der permanenten Überwachung der Schientemperaturen gehen folgende Temperaturunterschiede zwischen den Schienenprofilen EN 54E2 und EN 60E2 hervor:

- West-Südwest ca. 3°C
- Süd-Südwest ca. 2°C

Zwecks der Vergleichbarkeit der Daten aus den manuellen Messungen mit den Daten aus der permanenten Temperaturüberwachung, werden für die Ermittlung der Funktionen Schientemperaturen, gemessen am Schienensteg, verwendet.

In den nachfolgenden Kapiteln wird der Weg zur Herleitung der linearen Funktionen für die Schienenexponierungen Ost-Südost, Süd-Südost, Süd-Südwest und West-Südwest beschrieben. Aufgrund der Erkenntnisse aus Kap. 6.2.3 werden für die Herleitung der Funktionen die Temperaturdaten für EN 54E2 Schienen verwendet.

Folgende Exponierungen werden zusammen betrachtet:

- West-Südwest gilt auch für Südwest
- Süd-Südwest gilt auch für Süd und Ost / West
- Süd-Südost gilt auch für Südost
- Ost-Südost gilt nur für Ost-Südost

Die lineare Funktion zur Berechnung der maximalen Schienentemperatur zu jeder beliebigen maximalen Tagestemperatur lautet $y = m \cdot x + b$. Darin ist:

y: abhängige Variable (Schienentemperatur)

x: unabhängige Variable (Lufttemperatur)

m: Steigung (Änderung von y pro zusätzliche Einheit x)

b: y-Achsenabschnitt (y-Wert bei $x = 0$)

Zur Vereinfachung wird der Achsenabschnitt b für alle Funktionen für die unterschiedlichen Schienenexponierungen identisch bestimmt (Mittelwert aller Achsenabstände aus den Funktionen für die maximalen Schienentemperaturen für das Schienenprofil EN 54E2 gem. Kap. 6.1.3). Nachfolgende Gründe stützen diesen Entscheid:

- Bei 0°C Lufttemperatur wird die Schiene nur wenig erwärmt, d. h. die Unterschiede zwischen den verschiedenen Exponierungen sind sehr gering.
- Im Winter ist der Höhepunkt der Lufttemperatur früher erreicht (13 bis 15 Uhr), als im Sommer (15 bis 17 Uhr). Demzufolge ist davon auszugehen, dass eine Schiene mit Exponierung Süd-Südwest im Winter wärmer wird als eine Schiene mit Exponierung West-Südwest. Umgekehrt wird eine Schiene mit Exponierung West-Südwest im Sommer wärmer als eine Schiene mit Exponierung Süd-Südwest.

Die Steigung m der Funktionen wird über die Berechnung des Werts der Schienentemperatur des Schienenprofils EN 54E2 bei $T_{\text{Luft}} = 32.5^\circ\text{C}$ für jede Exponierung bestimmt. Grund dafür: Die Lufttemperaturen bei den manuellen Messungen der Schienentemperatur lagen in Allaman und Cop-pet bei 32,3, resp. 32,5°C. Somit ist die Vergleichbarkeit gegeben.

Eingrenzung: Die in den nachfolgenden Kapiteln erstellten Funktionen wurden nach empirischer Methode bestimmt und können für den die Schiene betreffenden Temperaturbereich angewendet werden.

6.3.1 Datengrundlage für Exponierung West-Südwest

Drei Testgleise mit kontinuierlicher Temperaturmessung sind WSW-exponiert (Kap. 6.1.1). Zwei davon (Luzern Verkehrshaus und Lugano Vedeggio) sind Stahlschwellengleise mit EN 54E2 Schienenprofil. Das Testgleis in Pratteln hat Betonschwellen und Schienenprofil EN 60E2. Aus den Temperaturdiagrammen in Kap. 6.1.3 können nachfolgende Funktionen für die Berechnung der maximalen Schienentemperatur zu jeder beliebigen maximalen Tagestemperatur bei ganztägig sonnigen Wetterverhältnissen entnommen werden:

Pratteln (60E2): $y = 1.0014x + 18.822$. Bei $T_{\text{Luft}} = 32.5^{\circ}\text{C}$ beträgt $T_{\text{Schiene}} = 51.4^{\circ}\text{C}$
 Luzern VH (54E2): $y = 1.0872x + 19.596$. Bei $T_{\text{Luft}} = 32.5^{\circ}\text{C}$ beträgt $T_{\text{Schiene}} = 54.9^{\circ}\text{C}$
 Lugano Vedeggio (54E2): $y = 1.1079x + 18.555$. Bei $T_{\text{Luft}} = 32.5^{\circ}\text{C}$ beträgt $T_{\text{Schiene}} = 54.6^{\circ}\text{C}$

Der Temperaturunterschied zwischen den Schienenprofilen EN 54E2 und 60E2 liegt an den Testorten mit Exponierung West-Südwest bei 3.2 bis 3.5°C.

6.3.2 Datengrundlage für Exponierung Süd-Südwest

Drei Testgleise mit permanenter Temperaturmessung sind Süd-Südwest-exponiert (Kap. 6.1.1). Basel SBB mit Holzschwellen und Schienenprofil EN 54E2, Chiasso und Visp mit Betonschwellen und Schienenprofil EN 60E2.

Aus den Temperaturdiagrammen in Kap. 6.1.3 können nachfolgende Funktionen für die Berechnung der maximalen Schienentemperatur zu jeder beliebigen maximalen Tagestemperatur bei ganztägig sonnigen Wetterverhältnissen ermittelt/hergeleitet werden:

Basel SBB (54E2): $y = 1.0441x + 17.876$. Bei $T_{\text{Luft}} = 32.5^{\circ}\text{C}$ beträgt $T_{\text{Schiene}} = 51.8^{\circ}\text{C}$
 Visp (60E2): $y = 0.9886x + 18.650$. Bei $T_{\text{Luft}} = 32.5^{\circ}\text{C}$ beträgt $T_{\text{Schiene}} = 50.8^{\circ}\text{C}$
 Chiasso (60E2): $y = 1.0586x + 15.258$. Bei $T_{\text{Luft}} = 32.5^{\circ}\text{C}$ beträgt $T_{\text{Schiene}} = 49.7^{\circ}\text{C}$

Der Temperaturunterschied zwischen den Schienenprofilen EN 54E2 und 60E2 beträgt an den Testorten mit Exponierung Süd-Südwest 1.0 bis 2.1°C.

6.3.3 Datengrundlage für Exponierung Süd-Südost

Von Gleisen mit Süd-Südost-exponierten Schienen sind lediglich Messdaten von Handmessungen in zwei verschiedenen Gleisen vorhanden.

- Allaman Gleis 21
- Rheinfelden Gleis 75

Tabelle 7: Vergleich der maximalen Luft- und Schienentemperaturen zwischen zwei Süd-Südost-exponierten Gleisen

Ort	Schienenprofil	T _{max, Luft} [°C]	T _{max, Schiene} [°C]
Allaman	EN 60E2	32.3	49.5
Rheinfelden	EN 54E2	33.9	54.5

Die maximale Lufttemperatur in Rheinfelden lag am Tag der Messung mit 33.9°C höher als jene in Allaman (32.3°C). Wird der Schienentemperaturwert um 1.6°C (ΔT_{Luft}) mal Faktor 1.1² reduziert, ergäbe sich eine Schienentemperatur von 52.7°C (und nicht 54.5°C). Der Temperaturunterschied

² Faktor zur Berechnung Schienentemperatur auf Basis der empirisch ermittelten Funktionen in Kap. 6.1.3

zwischen Schienenprofil EN 54E2 und 60E2 würde somit theoretisch 3.2°C betragen. Nachfolgende Tatsache bietet eine plausible Erklärung für die Diskrepanz zwischen dem erwarteten Wert von 52.7°C und dem gemessenen Wert von 54.5°C.

Die Wettermessstation liegt nicht in Rheinfelden, sondern im 6km Luftlinie entfernten Wallbach. Es ist naheliegend, dass die tatsächliche Lufttemperatur in Rheinfelden am Tag der Messung höher lag als in Wallbach. Dieser Hinweis ergibt sich aus den zwei nachfolgenden Ausschnitten (siehe Abbildung 32 und Abbildung 33) mit Angaben zum Mittelwert aus den höchsten Jahreslufttemperaturen zwischen 2000 und 2024 in Gleisnähe (500 x 500 m Raster). In Rheinfelden liegt der Mittelwert der höchsten Jahreslufttemperaturen um 1.1°C höher als in Wallbach.



Abbildung 32: Mittelwert höchste Lufttemperaturen für Rheinfelden im Jahr von 2000 bis 2024



Abbildung 33: Mittelwert höchste Lufttemperaturen in Wallbach im Jahr von 2000 bis 2024

Wenn die Lufttemperatur in Rheinfeldern also bei 35°C (33.9 + 1.1°C) gelegen ist, müsste der Schienentemperaturwert um 2.7°C x Faktor 1.1 reduziert werden. Damit ergibt sich eine Schienentemperatur von 51.5°C. Der Temperaturunterschied zwischen Schienenprofil EN 54E2 und 60E2 beträgt somit 2°C.

6.3.4 Datengrundlage für Exponierung Ost-Südost

Lediglich ein Testgleis mit permanenter Temperaturmessung ist Ost-Südost-exponiert (siehe Kap. 6.1.1). Thurbrücke Ossingen, Stahlbrücke mit Holzschwellen/Füllschwellen und Schienenprofil EN 60E2.

Aus dem Temperaturdiagramm in Kap. 6.1.3 kann nachfolgende Funktion für die Berechnung der maximalen Schienentemperatur zu jeder beliebigen maximalen Tagestemperatur bei ganztägig sonnigen Wetterverhältnissen entnommen werden:

Thurbrücke Ossingen (60E2): $y = 1.0752x + 14.702$. Bei $T_{\text{Luft}} = 32.5^\circ\text{C}$ beträgt $T_{\text{Schiene}} = 49.6^\circ\text{C}$

Im Rahmen der Handmessungen am Gleis wurden auch Schienentemperaturen in zwei Ost-Südost-exponierten Gleisen gemessen:

- Coppet, Gleisabschnitt zwischen Weiche 402 und 404
- Münchenstein Gleis 11

Tabelle 8: Vergleich der maximalen Luft- und Schienentemperaturen zwischen zwei Ost-Südost-exponierten Gleisen

Ort	Schienenprofil	T _{max, Luft} [°C]	T _{max, Schiene} [°C]
Coppet	EN 60E2	32.5	48.5
Münchenstein	EN 54E2	35.6	53.0

Die maximale Lufttemperatur in Münchenstein lag am Tag der Messung mit 35.6°C höher als jener in Coppet (32.5°C). Wird der Schienentemperaturwert um 3.1°C mal Faktor 1.1 reduziert, ergibt sich eine Schienentemperatur von 49.6°C.

Anhand der Daten aus den drei Gleisen ergibt sich ein Temperaturunterschied zwischen Schienenprofil EN 54E2 und 60E2 von 0 bis 1.1°C.

6.3.5 Funktionen für die Berechnung der maximalen Schienentemperaturen

Für die Herleitung der linearen Funktionen für die Exponierungen West-Südwest, Süd-Südwest, Süd-Südost und Ost-Südost muss der y-Achsenabschnitt b und die Steigung m berechnet werden. Wie in Kap. 6.3 beschrieben, wird für den y-Achsenabschnitt b der Mittelwert aus allen Funktionen gem. Kap. 6.1.3, Messdaten des Schienenstegs verwendet.

Tabelle 9: Die berechneten y-Achsenabschnitte für drei Orte und deren Mittelwert

Ort	y-Achsenabschnitt
Luzern VH	19.596
Lugano V	18.555
Basel PB	17.876
Mittelwert	18.676

Der mittlere y-Achsenabschnitt beträgt: $b = 18.676$

Anhand der Datenanalyse in Kap. 6.3.1 bis 6.3.4 ergeben sich folgende Temperaturwerte für die EN 54E2 Schienen bei 32.5°C:

Tabelle 10: Schienentemperaturen bei Lufttemperatur 32.5°C bei unterschiedlichen Schienenexponierungen

Exponierung	T _{Schiene bei T_{Luft} = 32.5°C} [°C]
West-Südwest	54.8
Süd-Südwest	51.8
Süd-Südost	51.5
Ost-Südost	49.6

Verglichen mit den Forschungsergebnissen in der Dissertation von Braess (2018) liegt der Wert für die Exponierung Süd-Südwest zu tief. Es war auch nur eine Messreihe für das Schienenprofil EN 54E2 für diese Datengrundlage zur Verfügung. Der Wert wird deshalb um 1.2°C nach oben auf 53°C korrigiert.

Der Korrekturwert von 1.2°C basiert auf den Erkenntnissen aus den permanenten Messungen der Schienentemperatur bei der SBB (siehe Kap. 6.1.3) und auf den Vergleichen der maximalen Schienentemperaturen bei unterschiedlicher Exponierungen aus der Dissertation von Braess (2018) (Kap. 3, Abbildung 2 und Abbildung 3). Die maximale Schienentemperatur eines Süd-

Südwest-exponierten Gleises muss etwa in der Mitte zwischen den maximalen Schienentemperaturen von West-Südwest- und Süd-Südost-exponierten Gleisen liegen.

Aus den oben aufgeführten Werten für die maximale Schienentemperatur werden die Steigungen der einzelnen Funktionen berechnet:

Tabelle 11: Parameter der linearen Funktionen bei unterschiedlichen Exponierungen

Exponierung	T Schiene bei T _{Luft} = 32.5°C [°C]	y-Achsenabschnitt	Steigung m
West-Südwest	54.8	18.676	1.1115
Süd-Südwest	53.0*	18.676	1.0561
Süd-Südost	51.5	18.676	1.0100
Ost-Südost	49.6	18.676	0.9515

* korrigierter Wert

Folgende lineare Funktionen für die Berechnung der maximalen Schienentemperatur zu jeder beliebigen maximalen Tagestemperatur bei ganztägig sonnigen Wetterverhältnissen können nun bestimmt werden:

- Exponierung West-Südwest WSW:** $y = 1.1115x + 18.676$
- Exponierung Süd-Südwest SSW:** $y = 1.0561x + 18.676$
- Exponierung Süd-Südost SSO:** $y = 1.0100x + 18.676$
- Exponierung Ost-Südost OSO:** $y = 0.9515x + 18.676$

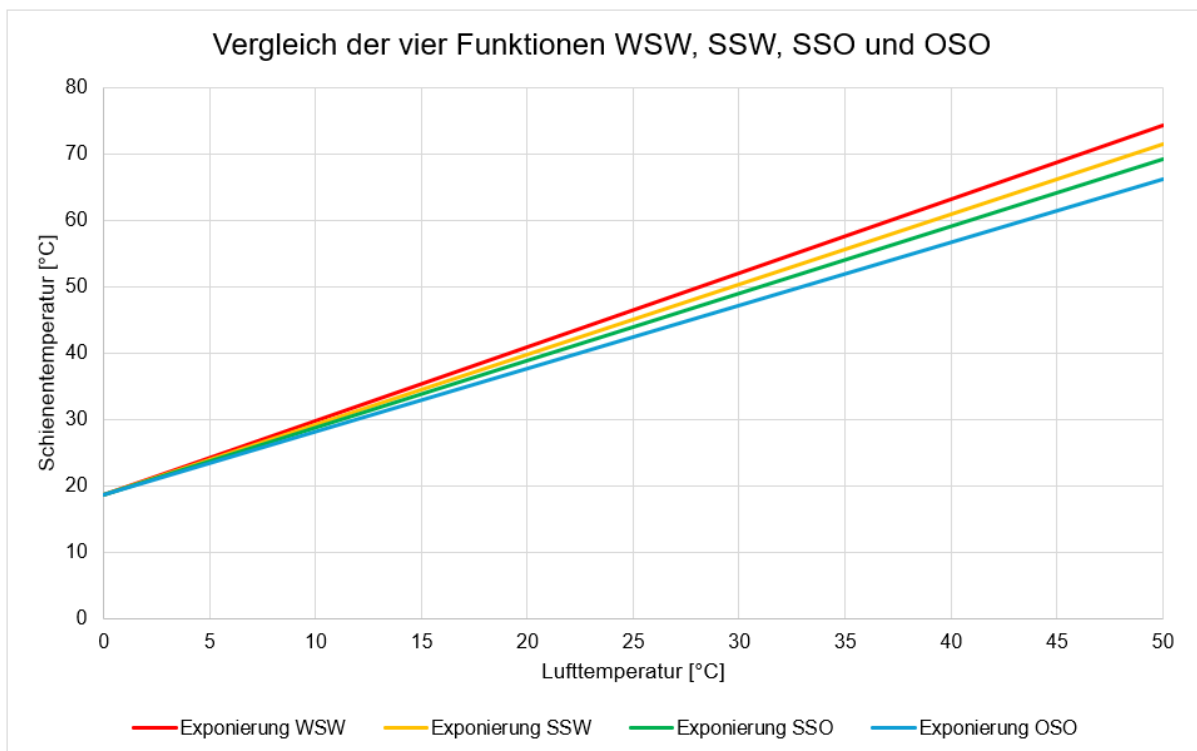


Abbildung 34: Lineare Funktionen zur Berechnung der maximalen Schienentemperatur für unterschiedliche Gleisexponierungen

Die vier Funktionen können zur Ermittlung der maximalen Schientemperatur an durchgehend sonnigen Tagen angewendet werden. Für den Bereich mit Lufttemperatur < 15°C wurden die Funktionen nicht verifiziert.

6.3.6 Rückrechnung zur Überprüfung der Funktionen

Für Exponierung WSW: Standort Luzern Verkehrshaus-Meggen

Bei Lufttemperatur 15°C: $T_{\text{Schiene}} = 1.1115 \times T_{\text{Luft}} + 18.676 = 35.3^{\circ}\text{C}$

Bei Lufttemperatur 30°C: $T_{\text{Schiene}} = 1.1115 \times T_{\text{Luft}} + 18.676 = 52.0^{\circ}\text{C}$

Die berechneten zwei Schientemperaturen bei 15°C, resp. 30°C sind in Abbildung 35 als rote Punkte eingetragen und die Funktion als rote gestrichelte Linie dargestellt.

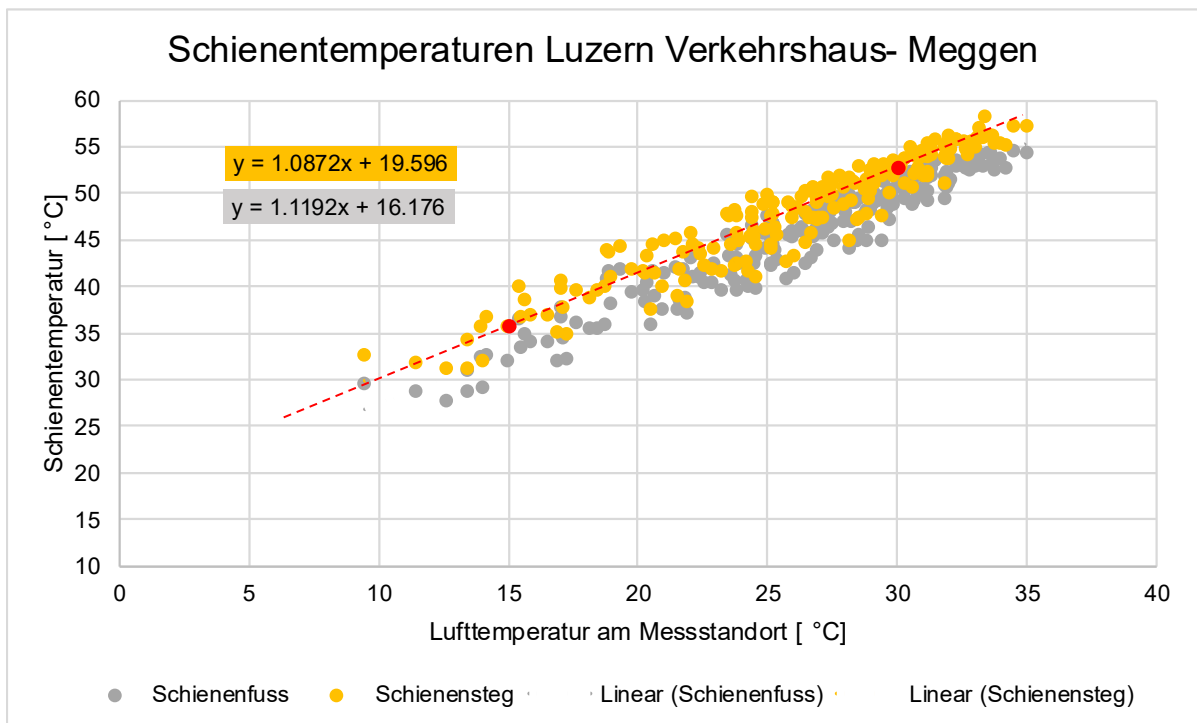


Abbildung 35: Rückrechnung Formel Schientemperatur WSW

Für Exponierung SSW: Standort Basel SBB

Bei Lufttemperatur 15°C: $T_{\text{Schiene}} = 1.0561 \times T_{\text{Luft}} + 18.676 = 34.5^\circ\text{C}$

Bei Lufttemperatur 30°C: $T_{\text{Schiene}} = 1.0561 \times T_{\text{Luft}} + 18.676 = 50.3^\circ\text{C}$

Die berechneten zwei Schientemperaturen bei 15°C, resp. 30°C sind in Abbildung 36 als rote Punkte eingetragen und die Funktion als rote gestrichelte Linie dargestellt.

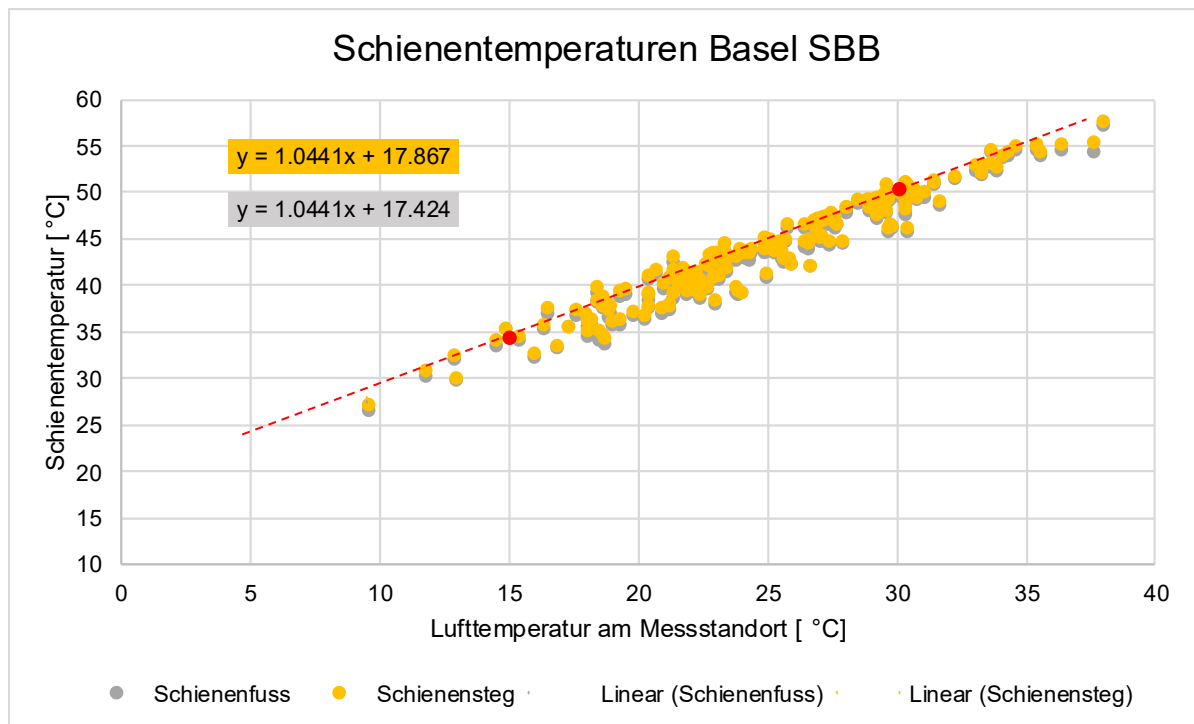


Abbildung 36: Rückrechnung Formel Schientemperatur Exponierung Süd-Südwest (SSW)

Für Exponierung OSO: Standort Thurbrücke Ossingen

Bei Lufttemperatur 20°C: $T_{\text{Schiene}} = 0.9515 \times T_{\text{Luft}} + 18.676 = 37.7^\circ\text{C}$

Bei Lufttemperatur 35°C: $T_{\text{Schiene}} = 0.9515 \times T_{\text{Luft}} + 18.676 = 52.0^\circ\text{C}$

Die berechneten zwei Schienentemperaturen bei 20°C, resp. 35°C sind in Abbildung 37 als rote Punkte eingetragen und die Funktion als rote gestrichelte Linie dargestellt.

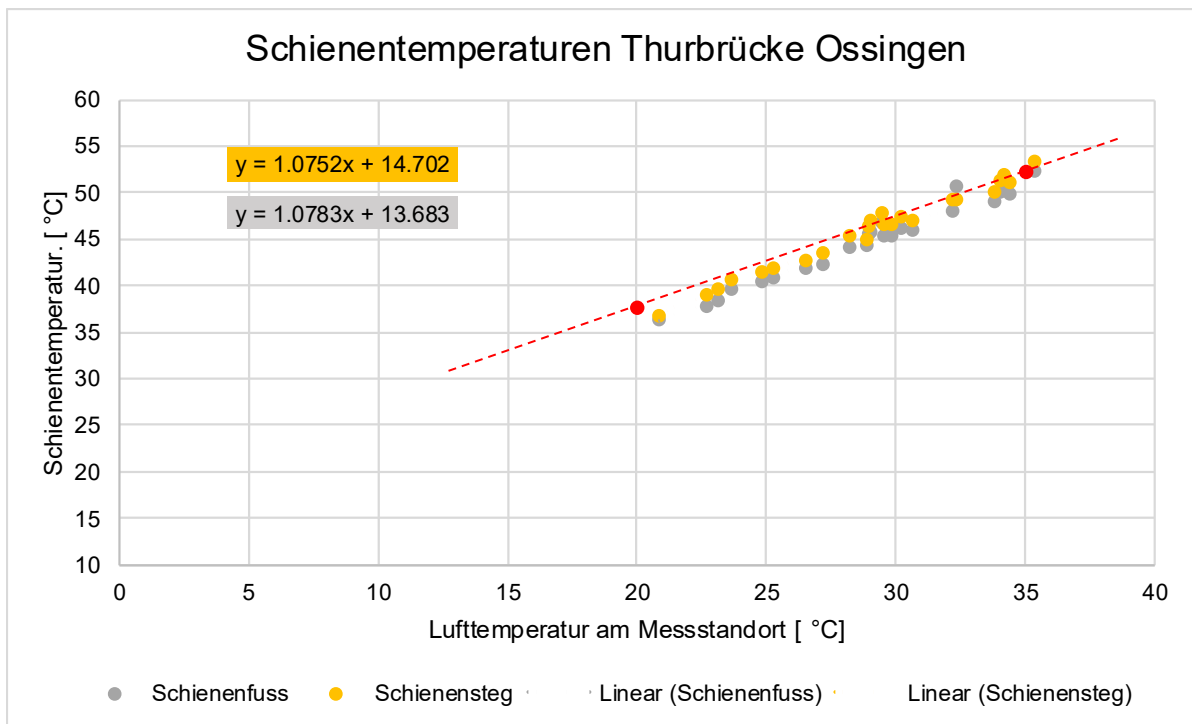


Abbildung 37: Rückrechnung Formel Schienentemperatur OSO

Die Rückrechnungen für die zwei Gleise mit West-Südwest- und Süd-Südwest-exponierten Schienen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den, im Gleis gemessenen, Werten. Anders ist dies beim Ost-Südost-exponierten Gleis. Die Steigung der modellierten Funktion ist kleiner als jene der an der Schiene gemessenen Werte. Diese Abweichung kam durch den einheitlichen Achsenabstand $b = 18.676$ und die damit verbundene geringe Steigung $m = 0.9515$ zustande. Die Steigung m müsste mindestens 1.0 betragen. Die modellierte Funktion zur Bestimmung der maximalen Schienentemperatur von Ost-Südost-exponierten Gleisen ist demnach im Lufttemperaturbereich zwischen $+25^\circ\text{C}$ bis $+35^\circ\text{C}$ zuverlässig. Je weiter weg die Lufttemperatur ausserhalb dieses Bereichs liegt, umso mehr nimmt die Abweichung der erwarteten von der gemessenen Schienentemperatur zu. Bei Lufttemperatur um $+40^\circ\text{C}$ kann die reale Schienentemperatur ca. 1 bis 2°C höher sein. Unterhalb $+25^\circ\text{C}$ wird die erwartete Temperatur eher überschätzt.

Da Ost-Südost-exponierte Gleise aber im Vergleich zu allen anders exponierten Gleisen sowieso die tiefsten maximalen Schienentemperaturen aufweisen, wird diese Abweichung zwischen erwarteten und gemessenen maximalen Schienentemperaturwerten vernachlässigt.

7 Auswertung von Lufttemperaturdaten

7.1 Bereitstellung der Daten

Das Ziel des dritten Teilprojekts ist die Erhebung von möglichst genauen Lufttemperaturdaten (2 m ab Boden) für die Vergangenheit (1967), die Gegenwart und die Zukunft (2060). Für die Vergangenheit ist das Jahr 1967 relevant, weil damals der Beginn des Baus von lückenlosen Gleisen nach den aktuell noch immer gültigen Vorgaben begann, d. h. diese Vorgaben an die damals entsprechenden klimatischen Bedingungen gebunden sind. Für die Zukunft wiederum ist das Jahr 2060 interessant, da eine heutige Änderung der Vorgaben bezüglich der Neutralisationstemperatur bis 2060 für ca. 80% vom Netz (Zuggleise) einer Schweizer Normalspurbahn relevant ist. Für die restlichen 20% des Bahnnetzes, z. B. Zuggleise auf Nebenstrecken oder Rangiergleise kann die relevante Zeitspanne für die Vorgaben bezüglich der Neutralisation der Schienen (entweder durch einen Schienenwechsel oder eine Fahrbahnerneuerung) 50 Jahre und mehr betragen. Die Datenmengen für die Auswertung müssen demzufolge so bestimmt werden, dass die Fehlertoleranz möglichst gering ist aber trotzdem eine statistisch aussagekräftige Menge an Daten vorhanden ist.

Nachfolgende Zeitperioden wurden aufgrund obengenannter Bedingungen für die Auswertung der vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Lufttemperaturen bestimmt:

- Historische Zeitperiode: 1940 bis 1999
- Gegenwärtige Zeitperiode: 2000 bis 2024
- Zukünftige Zeitperiode: 2051 bis 2070

Für jede Zeitperiode wurden folgende Variablen untersucht:

- Tiefste Lufttemperatur (Einzelereignis in Zeitperiode)
- Mittelwert der tiefsten Jahreslufttemperaturen über die gesamte Zeitperiode
- Höchste Lufttemperatur (Einzelereignis in Zeitperiode)
- Mittelwert der höchsten Jahreslufttemperaturen über die gesamte Zeitperiode
- Mittelwert der tiefsten und höchsten Lufttemperatur im Jahr
- Mittlere Jahreslufttemperatur

Die erforderlichen Daten inkl. Karten mit visualisierten Daten des Schweizer Bahnnetzes als html-Datei wurden durch meteoblue AG in Basel aufbereitet. Die Bereitstellung der Daten erfolgt in einer räumlichen Auflösung 500 x 500 m. Die räumliche Auflösung ist somit nicht zu grob, so dass z. B. einem Einschnitt mit höheren Lufttemperaturen Rechnung getragen wird, aber auch nicht zu fein, damit lokale Gegebenheiten (z. B. asphaltierte Fläche oder Hausdach) nicht einen massgebenden Einfluss auf das Ergebnis haben.

Die prognostizierten zukünftigen Temperaturwerte wurden für die vier unterschiedlichen Klimaszenarien SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 und SSP5-8.5³ berechnet.

Der Prozess der Datengenerierung kann wie folgt beschrieben werden:

- Verwendung von historischen Temperaturdaten von ERA5⁴. Diese Daten sind global verfügbar, sehr zuverlässig und reichen weit in die Vergangenheit zurück. Der Nachteil ist aber, dass sie sehr grob aufgelöst sind (ca. 30km räumliche Auflösung). Lokale Gegebenheiten können durch ERA5 also nicht dargestellt werden.
- Um die Daten zu verfeinern, wurden sie mit dem hochaufgelösten Wettermodell ICON-D2⁵ vom Deutschen Wetterdienst (DWD) kombiniert. Dieses Modell zeigt sehr genau, wie sich Temperatur kleinräumig unterscheidet, zum Beispiel durch Höhenunterschiede, Täler oder Städte. Der Prozess dieser Kombination wird "*statistical downscaling*" genannt. Das fein-räumliche Muster wird also auf die ERA5-Daten übertragen, wodurch ein hochaufgelöster historischer Temperaturdatensatz mit einer Auflösung von 500m mal 500m entsteht.
- Für die Zukunft werden anschliessend globale Klimamodelle genutzt, wie sie auch im IPCC⁶ verwendet werden. Diese Modelle sagen nicht die exakte Temperatur an jedem Ort voraus, sondern wie sich die Temperatur im Mittel (unter Berücksichtigung eines bestimmten Klimaszenarios) verändern wird. Deshalb wird zuerst berechnet, wie stark sich die Temperatur zwischen Vergangenheit und Zukunft ändert (Delta-Wert). Diese Temperaturänderung wird dann auf jede einzelne Gitterzelle des hochaufgelösten Datensatzes aufaddiert.

Auf diese Weise erhält man hoch aufgelöste Temperaturwerte für die Zukunft, die sowohl die lokalen Unterschiede vor Ort als auch die erwartete Klimaerwärmung abbilden.

In Bereichen mit Tunnels entsprechen die Temperaturwerte jenen an der Erdoberfläche über den Tunnels. Die bereitgestellten Ergebnisse zu Lufttemperaturen über Tunnels dürfen deshalb nicht in die Auswertung einbezogen werden. Tunneltemperaturen sind nicht im Fokus der Untersuchung.

³ Die SSPs beschreiben mögliche zukünftige ökonomische und gesellschaftliche Entwicklungen wie Bevölkerungswachstum, Bruttoinlandsprodukt und Urbanisierung. Es existieren fünf verschiedene SSPs (SSP1 bis SSP5). Je nach sozioökonomischer Entwicklung kommt es zu unterschiedlichen möglichen Treibhausgasemissionen und dadurch Treibhausgas-konzentrationen.

⁴ ERA5 ist die fünfte Generation der ECMWF-Atmosphären-Neuanalyse des globalen Klimas, die den Zeitraum von Januar 1940 bis heute abdeckt. ERA5 wird vom Copernicus Climate Change Service (C3S) am ECMWF produziert

⁵ Das ICON-Modell (icosahedral non-hydrostatic) ist ein Computerprogramm, das der Deutsche Wetterdienst verwendet, um globale Wettervorhersagen zu erstellen. Das Wettermodell wurde gemeinsam vom DWD und dem Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickelt.

⁶ The Intergovernmental Panel on Climate Change, www.ipcc.ch



Abbildung 38: Karte Bahnnetz Schweiz mit visualisierten Temperaturdaten



Abbildung 39: Detailansicht Karte Bahnnetz Schweiz mit visualisierten Temperaturdaten Raum Genfersee

Abbildung 38 zeigt eine Karte und visualisierten Lufttemperaturdaten für das Bahnnetz Schweiz am Beispiel von prognostizierten, zukünftigen Daten für das Klimaszenario SSP5-8.5. Beim Vergleich der vier prognosebedingten Klimaszenarien SSP1-2.6 bis SSP5-8.5 wird ersichtlich, dass die Temperaturwerte zwischen den vier Szenarien maximal 1°C auseinander liegen, wobei beim Szenario SSP5-8.5 jeweils die höchstmögliche Lufttemperatur ausgewiesen wird. Für die Datenauswertung werden aufgrund dieser Erkenntnis nur die Daten aus den Szenarien SSP1-2.6 und SSP5-8.5. weiterverwendet.

Abbildung 39 zeigt eine Detailansicht im Bereich westlicher Genferseeeregion. Ein farbiger Punkt entspricht jeweils einer Lufttemperatur für eine Messzelle in 500 x 500 m Auflösung. Gemäss dem meist pessimistischen Klimaszenario SSP5-8.5 können demnach im Bereich der Bahninfrastruktur zwischen Crans und Nyon im Jahr 2060 Lufttemperaturwerte bis zu 43.8°C erreicht werden.

7.2 Datenauswertung der meteoblue AG

Auf Basis der durch meteoblue AG bereitgestellten Lufttemperaturdaten (Kapitel 7.1) werden für das gesamte Normalspurbahnnetz der Schweiz in Bezug auf die zu erwartenden minimalen und maximalen Schienentemperaturen relevante Gleisabschnitte einzelner Abschnitte von DfA-Linien, vollständiger DfA-Linien oder ggf. Gruppen von DfA-Linien, falls sie in derselben Ausrichtung und Region liegen, bestimmt.

Nachfolgende Kriterien und Regeln spielen eine Rolle bei der Wahl des relevanten Abschnitts pro DfA-Linie:

- Basis: Karten mit Datenvisualisierungen für Jahr 2060, SSP5-8.5
- Exponierung des Gleises (Relevanz abhängig von Exponierung in absteigender Reihenfolge: West-Südwest, Südwest, Süd-Südwest, Süd, Süd-Südost, Südost, Ost-Südost)
- Der relevante Abschnitt muss:
 - Gleiche Exponierung von mind. 200 m Länge aufweisen
 - Schienen mit ganztägiger Besonnung aufweisen
 - Möglichst unbeeinflusst durch Wind sein
- Extremwerte für Lufttemperatur mit möglichst grosser Temperaturspanne (möglichst tiefer und zugleich hoher Temperaturwert für Jahr 2060 nach SSP5-8.5)

Für jede DfA-Linie (auch Abschnitte oder Gruppen davon gem. vorangehendem Beschrieb) sind nachfolgende Temperaturdaten für die Bestimmung der zukünftigen Neutralisationstemperatur notwendig:

- Tiefste Lufttemperatur (Einzelereignis in Zeitperiode)
- Mittelwert der tiefsten Jahreslufttemperaturen über die gesamte Zeitperiode
- Höchste Lufttemperatur (Einzelereignis in Zeitperiode)
- Delta T berechnet aus «Tiefste Lufttemperatur» und «Mittelwert der tiefsten Jahreslufttemperaturen über die gesamte Zeitperiode»

Auf Basis der beiden Karten in Abbildung 40 und Abbildung 41 mit Visualisierung der minimalen und maximalen prognostizierten Lufttemperaturen nach SSP5-8.5 am Beispiel der DfA-Linie 100 zwischen Montreux und Visp lässt sich die Abschnittseinteilung veranschaulichen:

- Montreux bis Martigny (Aigle): Exponierung südwestlich, mildere Temperaturen im Winter, mittlere Maximaltemperaturen im Sommer
- Martigny bis Sierre (St-Léonard): Exponierung südöstlich, mildere Temperaturen im Winter, hohe Maximaltemperaturen im Sommer
- Sierre bis Brig (Visp): Exponierung südlich bis südwestlich, tiefe Temperaturen im Winter, mittlere Maximaltemperaturen im Sommer

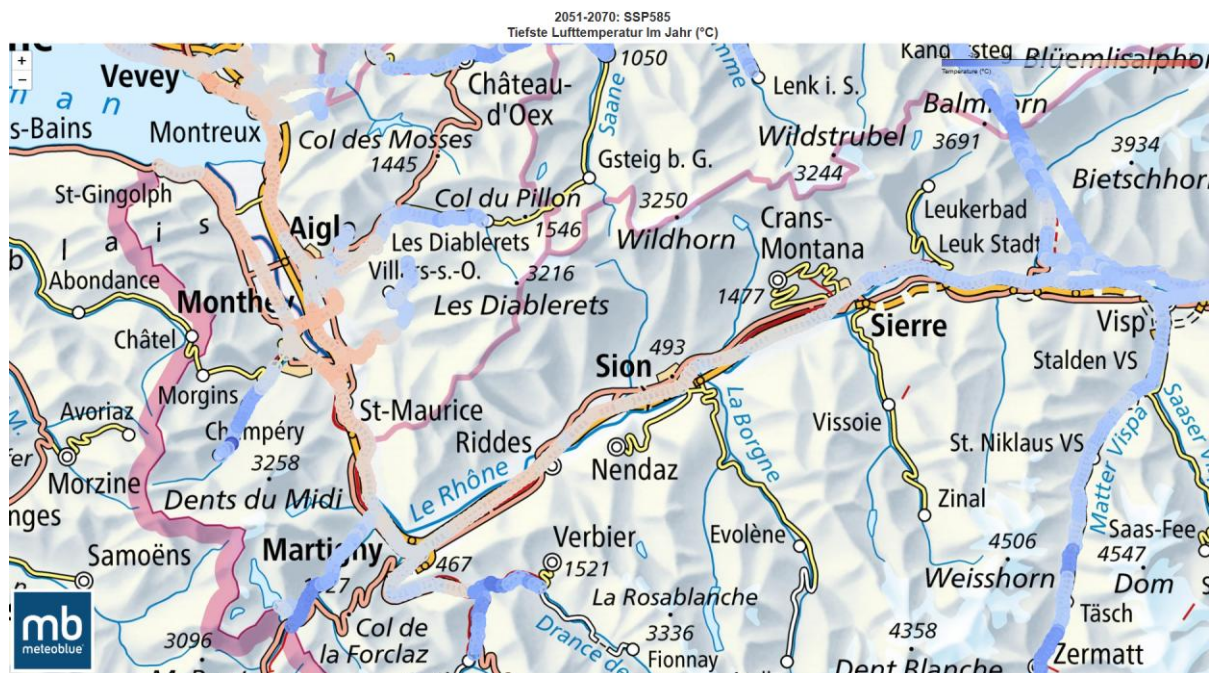


Abbildung 40: Karte mit Datenvisualisierung minimale Lufttemperaturen 2060 nach SSP5-8.5



Abbildung 41: Karte mit Datenvisualisierung maximale Lufttemperaturen 2060 nach SSP5-8.5

Beim Datenvergleich der drei Abschnitte auf der DfA-Linie 100 in Tabelle 12 fällt der grosse Unterschied bei den Minimaltemperaturen auf. Die Maximaltemperaturen liegen mit max. 1.6°C nicht weit auseinander, jedoch hat die unterschiedliche Exponierung der Gleise auf den drei Abschnitten einen sehr unterschiedlichen Einfluss auf die effektive Maximaltemperatur in der Schiene bei maximaler Lufttemperatur.

Tabelle 12: Vergleich Lufttemperaturdaten DfA-Linie 100

Ort	DfA-Linie Nr.	Exponierung Schienen	Infrastruktur	T _n aktuell	2051-2070 SSP585	
					Tiefste Jahrestemperatur	Höchste Jahrestemperatur
Aigle	100	WSW	SBB	25	-10.8	41.5
St-Léonard	100	SSO	SBB	25	-9.6	43.1
Visp	100	SW	SBB	25	-15.7	42.8

Insgesamt wurden 61 DfA-Linien (oder Abschnitte davon) bestimmt, welche aufgrund der Exponierung und Temperaturverhältnisse in Bezug auf die Neutralisationstemperatur voneinander getrennt betrachtet werden müssen. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen 13 bis 16 zu finden.

Nachfolgende DfA-Linien werden in einzelne Abschnitte unterteilt:

- Linie 100
 - Lausanne-Montreux (Rivaz)
 - Montreux-Martigny (Aigle)
 - Martigny-Sierre (St-Léonard)
 - Sierre-Brig (Visp)
- Linie 150
 - Genève-Gland (Versoix)
 - Gland-Lausanne (Allaman)
- Linie 200
 - Lausanne-Daillens (Penthalaz)
 - Daillens-Le Day km 39.000 (La Sarraz)
 - Le Day ab km 39.000 (Le Day)
- Linie 250
 - Puidoux-Matran (Vauderens)
 - Matran-Bern (Düdingen)
- Linie 300
 - Lötschberg Südrampe (Eggerberg)
 - Lötschberg Nordseite (Aeschi bei Spiez)
- Linie 460
 - Rüfenacht-Entlebuch (Wiggen)
 - Entlebuch-Fluhmühle (Wolhusen)
- Linie 500
 - Basel-HBT (Liestal)
 - HBT-Luzern (Zofingen)
- Linie 600
 - Immensee-Amsteg (Attinghausen)
 - Amsteg-Gotthard Bergtunnel (Gurtellen)
 - Gotthard Bergtunnel-Lavorgo (Ambri)
 - Lavorgo-Bellinzona exkl. Biasca (Giornico)
 - Bellinzona-Chiasso (Melano)
- Linie 880
 - St. Gallen-St. Margrethen (Rheineck)
 - St. Margrethen-Sargans (Buchs SG)

Nachfolgende DfA-Linien können als Gruppe zusammen betrachtet werden:

- 200, 201, 203
- 440, 441
- 400, 410, 450
- 500, 651, 653, 711
- 640, 650, 504
- 701, 702
- 710, 703, 761
- 720, 730
- 740, 753, 754
- 760/770, 762, 821
- 820, 822, 824, 840
- 852, 830, 831
- 871, 870, 872
- 880, 881
- 900, 890
- 570, 660
- 600, 665
- 600, 595 (Biasca)
- 600, 634 (Ab Mendrisio)
- 670, 673

Tabelle 13: Tabelle mit relevanten Temperaturdaten pro DfA-Line in Vergangenheit

Ort	DfA-Linie Nr.	Exponierung Schienen	Infrastruktur	T _n aktuell	1940-1999			
					Tiefste Jahrestemperatur	Mittelwert tiefste Jahrestemperatur	ΔT (tiefste und Mittelwert tiefste)	Höchste Jahrestemperatur
Versoix	150	OSO	SBB	25	-11.3	-9.3	2.0	38.4
Meyrin	151	SSO	SBB	25	-22.1	-12.1	10.0	37.5
Allaman	150	SSO	SBB	25	-20.9	-16.1	4.8	36.6
Rivaz	100	SSW	SBB	25	-25.8	-8.6	17.2	37.9
Aigle	100	WSW	SBB	25	-14.0	-11.5	2.5	36.6
St-Léonard	100	SSO	SBB	25	-15.8	-13.8	2.0	38.0
Visp	100	SW	SBB	25	-21.5	-15.1	6.4	36.6
Eggerberg	300	SSW	BLS	28	-22.4	-16.0	6.4	35.4
Aeschi b. S.	300	WSW	BLS	25	-16.2	-15.7	0.5	33.1
Oey	320	SSO	BLS	25	-18.7	-14.1	4.6	33.4
Einigen	310	SW	BLS	25	-26.2	-15.0	11.2	34.2
Wichtrach	290	WSW	SBB	25	-36.9	-13.8	23.1	37.5
Penthalaz	200	WSW	SBB	25	-16.8	-6.2	10.6	37.8
La Sarraz	200	SW	SBB	25	-22.1	-8.3	13.8	39.0
Le Day	200	SSO	SBB	25	-30.2	-11.7	18.5	35.6
Yvonand	252	SSW	SBB	25	-18.0	-8.4	9.6	39.1
Studen BE	260	WSW	SBB	25	-23.1	-12.1	11.0	36.9
Kerzers	220	SSW	BLS	25	-28.7	-12.1	16.6	37.6
Dompierre FR	251	SSO	SBB	25	-21.4	-12.5	8.9	38.5
Corcelles p. P.	253	SW	SBB	25	-23.6	-12.7	10.9	38.4
Vuisternens d. R.	254	SSW	TPF	25	-23.0	-13.0	10.0	34.4
Vauderens	250	OSO	SBB	25	-21.4	-10.2	11.2	36.3
Düdingen	250	OSO	SBB	25	-35.3	-14.4	20.9	36.3
Schwarzwasserbrücke	297	SW	BLS	25	-27.7	-15.1	12.6	35.6
Mühlethurnen	298	WSW	BLS	25	-30.2	-14.5	15.7	37.0
Twann	210	SSO	SBB	25	-17.0	-13.3	3.7	36.5
Noiraigue	219	SSW	SBB	25	-27.4	-12.9	14.5	35.5
St - Imier	225	SSO	SBB	25	-27.5	-15.4	12.1	32.4
Courgenay	240	WSW	SBB	25	-20.6	-14.4	6.2	36.5
Delémont	226	WSW	SBB	25	-35.8	-14.1	21.7	38.8
Münchenstein	230	WSW	SBB	25	-27.1	-13.3	13.8	38.0
Liestal	500	WSW	SBB	25	-33.7	-13.6	20.1	38.1
Wallbach	700	SSW	SBB	25	-22.8	-13.4	9.4	35.9
Derendingen	415	SW	SBB	25	-35.5	-29.2	6.3	38.0
Oberburg	440	WSW	BLS	25	-31.2	-14.1	17.1	36.2
Wiggen	460	WSW	SBB	25	-32.3	-14.5	17.8	31.1
Wolhusen	460	SW	SBB	25	-21.5	-11.3	10.2	35.5
Zofingen	500	WSW	SBB	25	-34.3	-14.1	20.2	37.6
Rupperswil	650	SSO	SBB	25	-31.7	-13.4	18.3	37.8
Rietheim	701	WSW	SBB	25	-27.6	-12.1	15.5	35.6
Spreitenbach	710	SSW	SBB	25	-29.6	-12.2	17.4	35.6
Herrliberg	730	WSW	SBB	25	-23.3	-10.1	13.2	35.2
Greifensee	740	SW	SBB	25	-29.5	-23.9	5.6	34.3
Andelfingen	762	WSW	SBB	25	-29.1	-12.7	16.4	35.0
Weinfeldern	840	SSW	SBB	25	-30.2	-12.7	17.5	36.4
Guntershausen	850	SSW	SBB	25	-33.2	-12.9	20.3	34.3
Sulgen	852	SW	SBB	25	-22.8	-13.4	9.4	36.4
Bütschwil	853	WSW	SBB	25	-33.2	-27.2	6.0	34.7
Ebnat-Kappel	871	WSW	SOB	25	-32.0	-13.5	18.5	33.4
Altmatt	673	WSW	SOB	25	-24.8	-15.1	9.7	30.2
Rheineck	880	WSW	SBB	25	-19.2	-13.3	5.9	34.9
Buchs SG	880	WSW	SBB	25	-28.1	-13.9	14.2	36.6
Bad Ragaz	900	SW	SBB	25	-21.6	-16.5	5.1	35.0
Meggen	570	WSW	SBB	25	-30.3	-10.3	20.0	35.6
Attinghausen	600	WSW	SBB	25	-26.4	-10.0	16.4	33.9
Gurtellen	600	OSO	SBB	25	-21.0	-12.4	8.6	33.2
Ambri	600	SSW	SBB	25	-28.6	-15.0	13.6	30.5
Giornico	600	WSW	SBB	25	-7.1	-5.1	2.0	34.7
Biasca	595	WSW	SBB	28	-20.3	-6.9	13.4	35.9
Riazzino	630	SSW	SBB	28	-0.3	1.7	2.0	36.3
Melano	600	WSW	SBB	28	-7.6	-6.1	1.5	34.4

Tabelle 14: Tabelle mit relevanten Temperaturdaten pro DfA-Line in der Gegenwart

Ort	DfA-Linie Nr.	Exponierung Schienen	Infrastruktur	T _n aktuell	2000-2024			
					Tiefste Jahrestemperatur	Mittelwert tiefste Jahrestemperatur	ΔT (tiefste und Mittelwert tiefste)	Höchste Jahrestemperatur
Versoix	150	OSO	SBB	25	-9.4	-8.6	0.8	41.3
Meyrin	151	SSO	SBB	25	-14.5	-8.3	6.2	41.8
Allaman	150	SSO	SBB	25	-11.8	-4.0	7.8	37.3
Rivaz	100	SSW	SBB	25	-15.0	-6.4	8.6	38.8
Aigle	100	WSW	SBB	25	-14.3	-9.6	4.7	38.5
St-Léonard	100	SSO	SBB	25	-13.1	-11.1	2.0	39.9
Visp	100	SW	SBB	25	-19.2	-14.7	4.5	39.6
Eggerberg	300	SSW	BLS	28	-20.2	-15.6	4.6	38.7
Aeschi b. S.	300	WSW	BLS	25	-14.5	-14.5	0.0	34.9
Oey	320	SSO	BLS	25	-16.8	-14.0	2.8	35.1
Einigen	310	SW	BLS	25	-18.2	-11.1	7.1	34.4
Wichtrach	290	WSW	SBB	25	-25.4	-10.1	15.3	37.7
Penthalaz	200	WSW	SBB	25	-9.6	-3.8	5.8	38.5
La Sarraz	200	SW	SBB	25	-13.2	-6.3	6.9	40.1
Le Day	200	SSO	SBB	25	-22.7	-10.7	12.0	37.5
Yvonand	252	SSW	SBB	25	-10.6	-6.4	4.2	40.1
Studen BE	260	WSW	SBB	25	-18.3	-9.2	9.1	37.9
Kerzers	220	SSW	BLS	25	-22.8	-9.2	13.6	38.7
Dompierre FR	251	SSO	SBB	25	-17.0	-9.5	7.5	39.6
Corcelles p. P.	253	SW	SBB	25	-18.8	-9.7	9.1	39.4
Vuisternens d. R.	254	SSW	TPF	25	-18.4	-11.4	7.0	35.8
Vauderens	250	OSO	SBB	25	-13.5	-8.1	5.4	37.7
Düdingen	250	OSO	SBB	25	-24.5	-10.6	13.9	36.5
Schwarzwasserbrücke	297	SW	BLS	25	-19.3	-11.2	8.1	35.8
Mühlethurnen	298	WSW	BLS	25	-20.8	-10.6	10.2	37.7
Twann	210	SSO	SBB	25	-13.5	-10.0	3.5	37.5
Noiraigue	219	SSW	SBB	25	-20.6	-11.7	8.9	36.5
St - Imier	225	SSO	SBB	25	-24.5	-13.9	10.6	33.3
Courgenay	240	WSW	SBB	25	-19.7	-11.4	8.3	37.2
Delémont	226	WSW	SBB	25	-24.9	-9.5	15.4	39.2
Münchenstein	230	WSW	SBB	25	-18.9	-9.1	9.8	38.2
Liestal	500	WSW	SBB	25	-23.5	-9.3	14.2	38.3
Wallbach	700	SSW	SBB	25	-15.6	-8.8	6.8	36.2
Derendingen	415	SW	SBB	25	-28.6	-10.5	18.1	38.4
Oberburg	440	WSW	BLS	25	-21.6	-10.3	11.3	36.4
Wiggen	460	WSW	SBB	25	-27.2	-11.4	15.8	32.7
Wolhusen	460	SW	SBB	25	-13.3	-7.9	5.4	36.0
Zofingen	500	WSW	SBB	25	-23.8	-9.6	14.2	38.0
Rupperswil	650	SSO	SBB	25	-21.9	-9.0	12.9	38.1
Rietheim	701	WSW	SBB	25	-17.3	-8.2	9.1	37.3
Spreitenbach	710	SSW	SBB	25	-21.1	-8.8	12.3	37.8
Herrliberg	730	WSW	SBB	25	-14.5	-7.4	7.1	36.2
Greifensee	740	SW	SBB	25	-21.2	-9.4	11.8	36.5
Andelfingen	762	WSW	SBB	25	-19.6	-9.5	10.1	36.7
Weinfelden	840	SSW	SBB	25	-18.2	-8.9	9.3	36.7
Guntershausen	850	SSW	SBB	25	-25.6	-9.4	16.2	35.8
Sulgen	852	SW	SBB	25	-13.8	-9.4	4.4	36.7
Bütschwil	853	WSW	SBB	25	-24.0	-11.7	12.3	34.7
Ebnat-Kappel	871	WSW	SOB	25	-23.4	-10.7	12.7	34.4
Altmatt	673	WSW	SOB	25	-21.4	-13.3	8.1	31.7
Rheineck	880	WSW	SBB	25	-11.5	-9.3	2.2	35.3
Buchs SG	880	WSW	SBB	25	-19.9	-11.0	8.9	36.6
Bad Ragaz	900	SW	SBB	25	-16.5	-15.5	1.0	35.5
Meggen	570	WSW	SBB	25	-19.0	-7.5	11.5	36.6
Attinghausen	600	WSW	SBB	25	-19.0	-8.0	11.0	34.2
Gurtellen	600	OSO	SBB	25	-16.6	-10.7	5.9	33.4
Ambri	600	SSW	SBB	25	-22.2	-13.1	9.1	35.1
Giornico	600	WSW	SBB	25	-5.9	-3.9	2.0	40.0
Biasca	595	WSW	SBB	28	-19.9	-4.5	15.4	37.9
Riazzino	630	SSW	SBB	28	-0.2	1.8	2.0	38.2
Melano	600	WSW	SBB	28	-6.5	-3.7	2.8	35.3

Tabelle 15: Tabelle mit relevanten Temperaturdaten pro DfA-Linie in Zukunft SSP1-2.6

Ort	DfA-Linie Nr.	Exponierung Schienen	Infrastruktur	T _n aktuell	2051-2070 SSP126			
					Tiefste Jahrestemperatur	Mittelwert tiefste Jahrestemperatur	ΔT (tiefste und Mittelwert tiefste)	Höchste Jahrestemperatur
Verseix	150	OSO	SBB	25	-7.2	-2.5	4.7	43.1
Meyrin	151	SSO	SBB	25	-12.3	-5.6	6.7	43.7
Allaman	150	SSO	SBB	25	-9.6	-3.0	6.6	39.2
Rivaz	100	SSW	SBB	25	-12.9	-6.4	6.5	40.8
Aigle	100	WSW	SBB	25	-12.1	-5.0	7.1	40.4
St-Léonard	100	SSO	SBB	25	-10.9	-7.6	3.3	42.1
Visp	100	SW	SBB	25	-17.0	-11.7	5.3	41.8
Eggerberg	300	SSW	BLS	28	-17.9	-12.6	5.3	40.8
Aeschi b. S.	300	WSW	BLS	25	-12.3	-6.8	5.5	37.0
Oey	320	SSO	BLS	25	-14.5	-8.2	6.3	37.3
Einigen	310	SW	BLS	25	-15.9	-8.8	7.1	36.5
Wichtrach	290	WSW	SBB	25	-23.1	-12.8	10.3	39.8
Penthalaz	200	WSW	SBB	25	-7.4	-2.1	5.3	40.5
La Sarraz	200	SW	SBB	25	-11.0	-5.6	5.4	42.0
Le Day	200	SSO	SBB	25	-20.5	-13.7	6.8	39.4
Yvonand	252	SSW	SBB	25	-8.4	-4.0	4.4	42.1
Studen BE	260	WSW	SBB	25	-16.3	-7.8	8.5	39.7
Kerzers	220	SSW	BLS	25	-20.6	-10.0	10.6	40.6
Dompierre FR	251	SSO	SBB	25	-14.9	-7.0	7.9	41.5
Corcelles p. P.	253	SW	SBB	25	-16.6	-8.1	8.5	41.4
Vuisternens d. R.	254	SSW	TPF	25	-16.2	-9.8	6.4	37.7
Vauderens	250	OSO	SBB	25	-11.3	-6.6	4.7	39.2
Düdingen	250	OSO	SBB	25	-22.2	-12.6	9.6	38.5
Schwarzwasserbrücke	297	SW	BLS	25	-17.0	-9.5	7.5	37.9
Mühlethurnen	298	WSW	BLS	25	-18.6	-10.2	8.4	39.4
Twann	210	SSO	SBB	25	-11.5	-5.2	6.3	39.5
Noiraigue	219	SSW	SBB	25	-18.4	-12.5	5.9	38.5
St - Imier	225	SSO	SBB	25	-22.4	-14.6	7.8	35.0
Courgenay	240	WSW	SBB	25	-17.6	-8.7	8.9	39.0
Delémont	226	WSW	SBB	25	-22.8	-13.1	9.7	41.1
Münchenstein	230	WSW	SBB	25	-16.8	-9.1	7.7	40.0
Liestal	500	WSW	SBB	25	-21.4	-12.0	9.4	40.1
Wallbach	700	SSW	SBB	25	-13.5	-7.2	6.3	38.1
Derendingen	415	SW	SBB	25	-26.6	-14.9	11.7	40.2
Oberburg	440	WSW	BLS	25	-19.5	-10.9	8.6	38.5
Wiggen	460	WSW	SBB	25	-25.0	-14.8	10.2	34.8
Wolhusen	460	SW	SBB	25	-11.1	-6.3	4.8	38.1
Zofingen	500	WSW	SBB	25	-21.7	-12.5	9.2	39.9
Ruppertswil	650	SSO	SBB	25	-19.7	-11.0	8.7	40.0
Rietheim	701	WSW	SBB	25	-15.2	-7.9	7.3	39.2
Spreitenbach	710	SSW	SBB	25	-19.0	-9.3	9.7	39.7
Herrliberg	730	WSW	SBB	25	-12.4	-6.4	6.0	38.3
Greifensee	740	SW	SBB	25	-19.0	-9.6	9.4	38.5
Andelfingen	762	WSW	SBB	25	-17.4	-9.2	8.2	38.8
Weinfelden	840	SSW	SBB	25	-15.9	-9.9	6.0	38.8
Guntershausen	850	SSW	SBB	25	-23.5	-11.7	11.8	37.9
Sulgen	852	SW	SBB	25	-11.5	-7.0	4.5	38.8
Bütschwil	853	WSW	SBB	25	-21.7	-14.4	7.3	36.8
Ebnat-Kappel	871	WSW	SOB	25	-22.0	-12.7	9.3	36.4
Altmatt	673	WSW	SOB	25	-19.3	-11.5	7.8	33.8
Rheineck	880	WSW	SBB	25	-9.3	-5.4	3.9	37.3
Buchs SG	880	WSW	SBB	25	-17.7	-11.2	6.5	38.7
Bad Ragaz	900	SW	SBB	25	-14.3	-10.7	3.6	38.0
Meggen	570	WSW	SBB	25	-16.8	-9.1	7.7	38.8
Attinghausen	600	WSW	SBB	25	-16.7	-9.1	7.6	36.6
Gurtellen	600	OSO	SBB	25	-14.2	-8.5	5.7	35.8
Ambri	600	SSW	SBB	25	-19.9	-13.6	6.3	37.5
Giornico	600	WSW	SBB	25	-3.6	-1.5	2.1	42.4
Biasca	595	WSW	SBB	28	-17.5	-4.0	13.5	40.3
Riazzino	630	SSW	SBB	28	2.1	2.3	0.2	40.6
Melano	600	WSW	SBB	28	-4.3	0.1	4.4	37.3

Tabelle 16: Tabelle mit relevanten Temperaturdaten pro DfA-Linie in Zukunft SSP5-8.5

Ort	DfA-Linie Nr.	Exponierung Schienen	Infrastruktur	T _n aktuell	2051-2070 SSP585			
					Tiefste Jahrestemperatur	Mittelwert tiefste Jahrestemperatur	ΔT (tiefste und Mittelwert tiefste)	Höchste Jahrestemperatur
Versoix	150	OSO	SBB	25	-6.0	-1.2	4.8	44.1
Meyrin	151	SSO	SBB	25	-11.1	-4.4	6.7	44.6
Allaman	150	SSO	SBB	25	-8.4	-1.7	6.7	40.3
Rivaz	100	SSW	SBB	25	-11.6	-5.1	6.5	41.8
Aigle	100	WSW	SBB	25	-10.8	-3.7	7.1	41.5
St-Léonard	100	SSO	SBB	25	-9.6	-6.3	3.3	43.1
Visp	100	SW	SBB	25	-15.7	-10.4	5.3	42.8
Eggerberg	300	SSW	BLS	28	-16.7	-11.3	5.4	41.8
Aeschi b. S.	300	WSW	BLS	25	-11.0	-5.5	5.5	38.0
Oey	320	SSO	BLS	25	-13.3	-6.9	6.4	38.3
Einigen	310	SW	BLS	25	-14.7	-7.5	7.2	37.5
Wichtrach	290	WSW	SBB	25	-21.9	-11.6	10.3	40.8
Penthalaz	200	WSW	SBB	25	-6.1	-0.8	5.3	41.5
La Sarraz	200	SW	SBB	25	-9.7	-4.3	5.4	43.0
Le Day	200	SSO	SBB	25	-19.2	-12.4	6.8	40.4
Yvonand	252	SSW	SBB	25	-7.2	-2.8	4.4	43.1
Studen BE	260	WSW	SBB	25	-15.0	-6.5	8.5	40.6
Kerzers	220	SSW	BLS	25	-19.3	-8.7	10.6	41.6
Dompierre FR	251	SSO	SBB	25	-13.6	-5.7	7.9	42.5
Corcelles p. P.	253	SW	SBB	25	-15.4	-6.8	8.6	42.4
Vuisternens d. R.	254	SSW	TPF	25	-15.0	-8.5	6.5	38.7
Vauderens	250	OSO	SBB	25	-10.1	-5.3	4.8	40.2
Düdingen	250	OSO	SBB	25	-21.0	-11.3	9.7	39.5
Schwarzwasserbrücke	297	SW	SBB	25	-15.7	-8.2	7.5	38.9
Mühlethurnen	298	WSW	BLS	25	-17.3	-8.9	8.4	40.4
Twann	210	SSO	SBB	25	-10.2	-3.9	6.3	40.5
Noiraigue	219	SSW	SBB	25	-17.1	-11.2	5.9	39.5
St - Imier	225	SSO	SBB	25	-21.1	-13.3	7.8	36.0
Courgenay	240	WSW	SBB	25	-16.3	-7.4	8.9	40.0
Delémont	226	WSW	SBB	25	-21.5	-11.8	9.7	42.0
Münchenstein	230	WSW	SBB	25	-15.5	-7.8	7.7	40.9
Liestal	500	WSW	SBB	25	-20.1	-10.6	9.5	41.0
Wallbach	700	SSW	SBB	25	-12.2	-5.9	6.3	39.0
Derendingen	415	SW	SBB	25	-25.2	-13.5	11.7	41.2
Oberburg	440	WSW	BLS	25	-18.2	-9.6	8.6	39.5
Wiggen	460	WSW	SBB	25	-23.7	-13.5	10.2	35.8
Wolhusen	460	SW	SBB	25	-9.8	-5.0	4.8	39.1
Zofingen	500	WSW	SBB	25	-20.4	-11.1	9.3	40.8
Ruppertswil	650	SSO	SBB	25	-18.4	-9.7	8.7	40.9
Rietheim	701	WSW	SBB	25	-13.8	-6.5	7.3	40.1
Spreitenbach	710	SSW	SBB	25	-17.6	-7.9	9.7	40.6
Herrliberg	730	WSW	SBB	25	-11.0	-5.1	5.9	39.2
Greifensee	740	SW	SBB	25	-17.7	-8.2	9.5	39.5
Andelfingen	762	WSW	SBB	25	-16.1	-7.9	8.2	39.7
Weinfelden	840	SSW	SBB	25	-14.6	-8.6	6.0	39.7
Guntershausen	850	SSW	SBB	25	-22.2	-10.4	11.8	38.8
Sulgen	852	SW	SBB	25	-10.2	-5.7	4.5	39.7
Bütschwil	853	WSW	SBB	25	-20.4	-13.1	7.3	37.7
Ebnat-Kappel	871	WSW	SOB	25	-20.7	-11.4	9.3	37.4
Altmatt	673	WSW	SOB	25	-17.9	-10.1	7.8	34.7
Rheineck	880	WSW	SBB	25	-8.0	-4.1	3.9	38.4
Buchs SG	880	WSW	SBB	25	-16.3	-9.9	6.4	39.6
Bad Ragaz	900	SW	SBB	25	-13.0	-9.4	3.6	38.9
Meggen	570	WSW	SBB	25	-15.5	-7.8	7.7	39.8
Attinghausen	600	WSW	SBB	25	-15.4	-7.9	7.5	37.6
Gurtellen	600	OSO	SBB	25	-13.0	-7.3	5.7	36.8
Ambri	600	SSW	SBB	25	-18.6	-12.3	6.3	38.5
Giornico	600	WSW	SBB	25	-2.3	-0.2	2.1	43.4
Biasca	595	WSW	SBB	28	-16.3	-2.8	13.5	41.3
Riazzino	630	SSW	SBB	28	3.4	3.5	0.1	41.5
Melano	600	WSW	SBB	28	-2.9	1.4	4.3	38.3

8 Zukünftige Neutralisationstemperatur

Die optimale Neutralisationstemperatur wird mittels nachfolgender Formel berechnet:

$$T_n = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} + \Delta_{Sicherheit}$$

Die für die Berechnung der Neutralisationstemperatur T_n notwendigen Variablen T_{min} und T_{max} , sowie die Konstante $\Delta_{Sicherheit}$ werden in den nachfolgenden Unterkapiteln hergeleitet und beschrieben.

8.1 Definition und Berechnung der minimalen Schienentemperatur

Für die Bestimmung der minimalen Schienentemperatur wird angenommen, dass diese üblicherweise in der Nacht, bei der tiefsten Lufttemperatur erreicht wird.

In der Praxis wird die minimale Schienentemperatur T_{min} meist so definiert:

- Nicht der absolute Extremwert, sondern ein charakteristischer Wert, nämlich der Mittelwert der tiefsten Jahrestemperaturen über einen Zeitraum von ca. 10–30 Jahren.
- Teilweise wird ein Sicherheitsaufschlag (z. B. 2–5°C tiefer) mitberücksichtigt.

Die minimale Schienentemperatur T_{min} wird demzufolge aus klimatologischen Zeitreihen ermittelt – meist als Mittelwert der jährlichen Minima über mehrere Jahrzehnte, ggf. mit Zuschlag.

Zum Zeitpunkt des Beginns vom Bau des lückenlosen Gleises lag die Neutralisationstemperatur bereits bei $T_N = 25^\circ\text{C}$, d. h. die minimale Schienentemperatur T_{min} liegt bei -15°C ($T_N - \Delta t_{max}$).

Anhand der Auswertung der historischen Lufttemperaturen (Zeitraum 1940 bis 1999) wird versucht, die damalige Berechnung der minimalen Schienentemperatur T_{min} nachzubilden.

Nachfolgende drei Ansätze wurden untersucht:

1. $T_{\min} = T_{\text{tiefste}} + \text{Faktor} \times \Delta T$

ΔT bezeichnet die Differenz zwischen der absolut tiefsten Jahrestemperatur und dem Mittelwert der tiefsten Jahrestemperaturen der gesamten Zeitperiode. Somit wird die Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses der tiefsten Jahrestemperatur miteinbezogen.

Tabelle 17: Berechnungsformel für Tiefste Jahrestemperatur der Schienen

ΔT (tiefste und Mittelwert tiefste Jahrestemperatur) [°C]	Berechnungsformel T_{\min}
0-6	$T_{\text{tiefste}} + 0.2 * \Delta T$
6.1-12	$T_{\text{tiefste}} + 0.4 * \Delta T$
12.1-18	$T_{\text{tiefste}} + 0.6 * \Delta T$
>18	$T_{\text{tiefste}} + 0.8 * \Delta T$

2. $T_{\min} = T_{\text{mittelwert}}$ mit Mittelwert der tiefsten Jahrestemperaturen über die gesamte Zeitperiode

3. $T_{\min} = T_{\min} + \text{Korrekturwert}$ basierend auf Klimaerwärmung.

T_{\min} auf Basis der aktuellen Minimaltemperatur T_{\min} (-15°C/-12°C) wird an die zukünftigen Zeitperioden angepasst. Korrekturwert: Differenz des Mittelwerts der Mittelwerte tiefster Jahrestemperaturen aller betrachteter Gleisabschnitte von zwei Zeitperioden. Als Referenz dient der aktuelle Zeitabschnitt 2000 bis 2024.

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den Berechnungen nach den drei Ansätzen dargestellt:

Tabelle 18: Minimale Schientemperaturen Vergangenheit und Gegenwart

Ort	DfA-Linie Nr.	1940-1999			2000-2024		
		T _{min} (Variante 1)	T _{min} (Variante 2)	T _{min} (Variante 3)	T _{min} (Variante 1)	T _{min} (Variante 2)	T _{min} (Variante 3)
Versoix	150	-10.9	-9.3	-15.0	-9.2	-8.6	-15.0
Meyrin	151	-18.1	-12.1	-15.0	-12.0	-8.3	-15.0
Allaman	150	-19.9	-16.1	-15.0	-8.7	-4.0	-15.0
Rivaz	100	-15.5	-8.6	-15.0	-11.6	-6.4	-15.0
Aigle	100	-13.5	-11.5	-15.0	-13.4	-9.6	-15.0
St-Léonard	100	-15.4	-13.8	-15.0	-12.7	-11.1	-15.0
Visp	100	-18.9	-15.1	-15.0	-18.3	-14.7	-15.0
Eggerberg	300	-19.8	-16.0	-12.0	-19.3	-15.6	-12.0
Aeschi b. S.	300	-16.1	-15.7	-15.0	-14.5	-14.5	-15.0
Oey	320	-17.8	-14.1	-15.0	-16.2	-14.0	-15.0
Einigen	310	-21.7	-15.0	-15.0	-15.4	-11.1	-15.0
Wichtrach	290	-18.4	-13.8	-15.0	-16.2	-10.1	-15.0
Penthalaz	200	-12.6	-6.2	-15.0	-8.4	-3.8	-15.0
La Sarraz	200	-13.8	-8.3	-15.0	-10.4	-6.3	-15.0
Le Day	200	-15.4	-11.7	-15.0	-17.9	-10.7	-15.0
Yvonand	252	-14.2	-8.4	-15.0	-9.8	-6.4	-15.0
Studen BE	260	-18.7	-12.1	-15.0	-14.7	-9.2	-15.0
Kerzers	220	-18.7	-12.1	-15.0	-14.6	-9.2	-15.0
Dompierre FR	251	-17.8	-12.5	-15.0	-14.0	-9.5	-15.0
Corcelles p. P.	253	-19.2	-12.7	-15.0	-15.2	-9.7	-15.0
Vuisternens d. R.	254	-19.0	-13.0	-15.0	-15.6	-11.4	-15.0
Vauderens	250	-16.9	-10.2	-15.0	-12.4	-8.1	-15.0
Düdingen	250	-18.6	-14.4	-15.0	-16.2	-10.6	-15.0
Schwarzwasserbrücke	297	-20.1	-15.1	-15.0	-16.1	-11.2	-15.0
Mühlethurnen	298	-20.8	-14.5	-15.0	-16.7	-10.6	-15.0
Twann	210	-16.3	-13.3	-15.0	-12.8	-10.0	-15.0
Noiraigue	219	-18.7	-12.9	-15.0	-17.0	-11.7	-15.0
St - Imier	225	-20.2	-15.4	-15.0	-20.3	-13.9	-15.0
Courgenay	240	-18.1	-14.4	-15.0	-16.4	-11.4	-15.0
Delémont	226	-18.4	-14.1	-15.0	-15.7	-9.5	-15.0
Münchenstein	230	-18.8	-13.3	-15.0	-15.0	-9.1	-15.0
Liestal	500	-17.6	-13.6	-15.0	-15.0	-9.3	-15.0
Wallbach	700	-19.0	-13.4	-15.0	-12.9	-8.8	-15.0
Derendingen	415	-33.0	-29.2	-15.0	-14.1	-10.5	-15.0
Oberburg	440	-20.9	-14.1	-15.0	-17.1	-10.3	-15.0
Wiggen	460	-21.6	-14.5	-15.0	-17.7	-11.4	-15.0
Wolhusen	460	-17.4	-11.3	-15.0	-12.2	-7.9	-15.0
Zofingen	500	-18.1	-14.1	-15.0	-15.3	-9.6	-15.0
Rupperswil	650	-17.1	-13.4	-15.0	-14.2	-9.0	-15.0
Rietheim	701	-18.3	-12.1	-15.0	-13.7	-8.2	-15.0
Spreitenbach	710	-19.2	-12.2	-15.0	-13.7	-8.8	-15.0
Herrliberg	730	-15.4	-10.1	-15.0	-11.7	-7.4	-15.0
Greifensee	740	-28.4	-23.9	-15.0	-16.5	-9.4	-15.0
Andelfingen	762	-19.3	-12.7	-15.0	-15.6	-9.5	-15.0
Weinfelden	840	-19.7	-12.7	-15.0	-14.5	-8.9	-15.0
Guntershausen	850	-17.0	-12.9	-15.0	-15.9	-9.4	-15.0
Sulgen	852	-19.0	-13.4	-15.0	-12.9	-9.4	-15.0
Bütschwil	853	-32.0	-27.2	-15.0	-16.6	-11.7	-15.0
Ebnat-Kappel	871	-17.2	-13.5	-15.0	-15.8	-10.7	-15.0
Altmatt	673	-20.9	-15.1	-15.0	-18.2	-13.3	-15.0
Rheineck	880	-18.0	-13.3	-15.0	-11.1	-9.3	-15.0
Buchs SG	880	-19.6	-13.9	-15.0	-16.3	-11.0	-15.0
Bad Ragaz	900	-20.6	-16.5	-15.0	-16.3	-15.5	-15.0
Meggen	570	-14.3	-10.3	-15.0	-14.4	-7.5	-15.0
Attinghausen	600	-16.6	-10.0	-15.0	-14.6	-8.0	-15.0
Gurtellen	600	-17.6	-12.4	-15.0	-15.4	-10.7	-15.0
Ambri	600	-20.4	-15.0	-15.0	-18.6	-13.1	-15.0
Giornico	600	-6.7	-5.1	-15.0	-5.5	-3.9	-15.0
Biasca	595	-12.3	-6.9	-12.0	-10.7	-4.5	-12.0
Riazzino	630	0.1	1.7	-12.0	0.2	1.8	-12.0
Melano	600	-7.3	-6.1	-12.0	-5.9	-3.7	-12.0

Tabelle 19: Zukünftige minimale Schienentemperaturen

Ort	DfA-Linie Nr.	2051-2070 SSP126			2051-2070 SSP585		
		T _{min} (Variante 1)	T _{min} (Variante 2)	T _{min} (Variante 3)	T _{min} (Variante 1)	T _{min} (Variante 2)	T _{min} (Variante 3)
Versoix	150	-6.3	-2.5	-14.2	-5.0	-1.2	-12.9
Meyrin	151	-9.6	-5.6	-14.2	-8.4	-4.4	-12.9
Allaman	150	-7.0	-3.0	-14.2	-5.7	-1.7	-12.9
Rivaz	100	-10.3	-6.4	-14.2	-9.0	-5.1	-12.9
Aigle	100	-9.3	-5.0	-14.2	-8.0	-3.7	-12.9
St-Léonard	100	-10.2	-7.6	-14.2	-8.9	-6.3	-12.9
Visp	100	-15.9	-11.7	-14.2	-14.6	-10.4	-12.9
Eggerberg	300	-16.8	-12.6	-11.2	-15.6	-11.3	-9.9
Aeschi b. S.	300	-11.2	-6.8	-14.2	-9.9	-5.5	-12.9
Oey	320	-12.0	-8.2	-14.2	-10.7	-6.9	-12.9
Einigen	310	-13.1	-8.8	-14.2	-11.8	-7.5	-12.9
Wichtrach	290	-19.0	-12.8	-14.2	-17.8	-11.6	-12.9
Penthalaz	200	-6.3	-2.1	-14.2	-5.0	-0.8	-12.9
La Sarraz	200	-9.9	-5.6	-14.2	-8.6	-4.3	-12.9
Le Day	200	-17.8	-13.7	-14.2	-16.5	-12.4	-12.9
Yvonand	252	-7.5	-4.0	-14.2	-6.3	-2.8	-12.9
Studen BE	260	-12.9	-7.8	-14.2	-11.6	-6.5	-12.9
Kerzers	220	-16.4	-10.0	-14.2	-15.1	-8.7	-12.9
Dompierre FR	251	-11.7	-7.0	-14.2	-10.4	-5.7	-12.9
Corcelles p. P.	253	-13.2	-8.1	-14.2	-12.0	-6.8	-12.9
Vuisternens d. R.	254	-13.6	-9.8	-14.2	-12.4	-8.5	-12.9
Vauderens	250	-10.4	-6.6	-14.2	-9.1	-5.3	-12.9
Düdingen	250	-18.4	-12.6	-14.2	-17.1	-11.3	-12.9
Schwarzwasserbrücke	297	-14.0	-9.5	-14.2	-12.7	-8.2	-12.9
Mühlethurnen	298	-15.2	-10.2	-14.2	-13.9	-8.9	-12.9
Twann	210	-9.0	-5.2	-14.2	-7.7	-3.9	-12.9
Noirigue	219	-17.2	-12.5	-14.2	-15.9	-11.2	-12.9
St - Imier	225	-19.3	-14.6	-14.2	-18.0	-13.3	-12.9
Courgenay	240	-14.0	-8.7	-14.2	-12.7	-7.4	-12.9
Delémont	226	-18.9	-13.1	-14.2	-17.6	-11.8	-12.9
Münchenstein	230	-13.7	-9.1	-14.2	-12.4	-7.8	-12.9
Liestal	500	-17.6	-12.0	-14.2	-16.3	-10.6	-12.9
Wallbach	700	-11.0	-7.2	-14.2	-9.7	-5.9	-12.9
Derendingen	415	-21.9	-14.9	-14.2	-20.5	-13.5	-12.9
Oberburg	440	-16.1	-10.9	-14.2	-14.8	-9.6	-12.9
Wiggen	460	-20.9	-14.8	-14.2	-19.6	-13.5	-12.9
Wolhusen	460	-10.1	-6.3	-14.2	-8.8	-5.0	-12.9
Zofingen	500	-18.0	-12.5	-14.2	-16.7	-11.1	-12.9
Rupperswil	650	-16.2	-11.0	-14.2	-14.9	-9.7	-12.9
Rietheim	701	-12.3	-7.9	-14.2	-10.9	-6.5	-12.9
Spreitenbach	710	-15.1	-9.3	-14.2	-13.7	-7.9	-12.9
Herrliberg	730	-11.2	-6.4	-14.2	-9.8	-5.1	-12.9
Greifensee	740	-15.2	-9.6	-14.2	-13.9	-8.2	-12.9
Andelfingen	762	-14.1	-9.2	-14.2	-12.8	-7.9	-12.9
Weinfelden	840	-14.7	-9.9	-14.2	-13.4	-8.6	-12.9
Guntershausen	850	-18.8	-11.7	-14.2	-17.5	-10.4	-12.9
Sulgen	852	-10.6	-7.0	-14.2	-9.3	-5.7	-12.9
Bütschwil	853	-18.8	-14.4	-14.2	-17.5	-13.1	-12.9
Ebnat-Kappel	871	-18.3	-12.7	-14.2	-17.0	-11.4	-12.9
Altmatt	673	-16.2	-11.5	-14.2	-14.8	-10.1	-12.9
Rheineck	880	-8.5	-5.4	-14.2	-7.2	-4.1	-12.9
Buchs SG	880	-15.1	-11.2	-14.2	-13.7	-9.9	-12.9
Bad Ragaz	900	-13.6	-10.7	-14.2	-12.3	-9.4	-12.9
Meggen	570	-13.7	-9.1	-14.2	-12.4	-7.8	-12.9
Attinghausen	600	-13.7	-9.1	-14.2	-12.4	-7.9	-12.9
Gurtellen	600	-13.1	-8.5	-14.2	-11.9	-7.3	-12.9
Ambri	600	-17.4	-13.6	-14.2	-16.1	-12.3	-12.9
Giornico	600	-3.2	-1.5	-14.2	-1.9	-0.2	-12.9
Biasca	595	-9.4	-4.0	-11.2	-8.2	-2.8	-9.9
Riazzino	630	2.1	2.3	-11.2	3.4	3.5	-9.9
Melano	600	-3.4	0.1	-11.2	-2.0	1.4	-9.9

8.2 Berechnung der maximalen Schienentemperatur

Die Berechnung der maximalen Schienentemperaturen $T_{\max, \text{Schiene}}$ erfolgt anhand der Formeln aus Kap. 6.3.5 auf Basis der maximalen Lufttemperaturdaten aus den jeweiligen Zeitperioden.

Tabelle 20: Berechnung der maximalen Schienentemperaturen

Ort	DfA-Linie Nr.	Exponierung Schienen	1940-1999	2000-2024	2051-2070 SSP126	2051-2070 SSP585
			$T_{\max, \text{Schiene}}$	$T_{\max, \text{Schiene}}$	$T_{\max, \text{Schiene}}$	$T_{\max, \text{Schiene}}$
Versoix	150	OSO	55.2	58.0	59.7	60.6
Meyrin	151	SSO	56.6	60.9	62.8	63.7
Allaman	150	SSO	55.6	56.3	58.3	59.4
Rivaz	100	SSW	58.7	59.7	61.8	62.8
Aigle	100	WSW	59.4	61.5	63.6	64.8
St-Léonard	100	SSO	57.1	59.0	61.2	62.2
Visp	100	SW	59.4	62.7	65.1	66.2
Eggerberg	300	SSW	56.1	59.5	61.8	62.8
Aeschi b. S.	300	WSW	55.5	57.5	59.8	60.9
Oey	320	SSO	52.4	54.1	56.3	57.4
Einigen	310	SW	56.7	56.9	59.2	60.4
Wichtrach	290	WSW	60.4	60.6	62.9	64.0
Penthalaz	200	WSW	60.7	61.5	63.7	64.8
La Sarraz	200	SW	62.0	63.2	65.4	66.5
Le Day	200	SSO	54.6	56.6	58.5	59.5
Yvonand	252	SSW	60.0	61.0	63.1	64.2
Studen BE	260	WSW	59.7	60.8	62.8	63.8
Kerzers	220	SSW	58.4	59.5	61.6	62.6
Dompierre FR	251	SSO	57.6	58.7	60.6	61.6
Corcelles p. P.	253	SW	61.4	62.5	64.7	65.8
Vuisternens d. R.	254	SSW	55.0	56.5	58.5	59.5
Vauderens	250	OSO	53.2	54.5	56.0	56.9
Düdingen	250	OSO	53.2	53.4	55.3	56.3
Schwarzwasserbrücke	297	SW	58.2	58.5	60.8	61.9
Mühlethurnen	298	WSW	59.8	60.6	62.5	63.6
Twann	210	SSO	55.5	56.6	58.6	59.6
Noiraigue	219	SSW	56.2	57.2	59.3	60.4
St - Imier	225	SSO	51.4	52.3	54.0	55.0
Courgenay	240	WSW	59.2	60.0	62.0	63.1
Delémont	226	WSW	61.8	62.2	64.4	65.4
Münchenstein	230	WSW	60.9	61.1	63.1	64.1
Liestal	500	WSW	61.0	61.2	63.2	64.2
Wallbach	700	SSW	56.6	56.9	58.9	59.9
Derendingen	415	SW	60.9	61.4	63.4	64.5
Oberburg	440	WSW	58.9	59.1	61.5	62.6
Wiggen	460	WSW	53.2	55.0	57.4	58.5
Wolhusen	460	SW	58.1	58.7	61.0	62.1
Zofingen	500	WSW	60.5	60.9	63.0	64.0
Rupperswil	650	SSO	56.9	57.2	59.1	60.0
Rietheim	701	WSW	58.2	60.1	62.2	63.2
Spreitenbach	710	SSW	56.3	58.6	60.6	61.6
Herrliberg	730	WSW	57.8	58.9	61.2	62.2
Greifensee	740	SW	56.8	59.2	61.5	62.6
Andelfingen	762	WSW	57.6	59.5	61.8	62.8
Weinfelden	840	SSW	57.1	57.4	59.7	60.6
Guntershausen	850	SSW	54.9	56.5	58.7	59.7
Sulgen	852	SW	59.1	59.5	61.8	62.8
Bütschwil	853	WSW	57.2	57.2	59.6	60.6
Ebnat-Kappel	871	WSW	55.8	56.9	59.1	60.2
Altmatt	673	WSW	52.2	53.9	56.2	57.2
Rheineck	880	WSW	57.5	57.9	60.1	61.4
Buchs SG	880	WSW	59.4	59.4	61.7	62.7
Bad Ragaz	900	SW	57.6	58.1	60.9	61.9
Meggen	570	WSW	58.2	59.4	61.8	62.9
Attinghausen	600	WSW	56.4	56.7	59.4	60.5
Gurtellen	600	OSO	50.3	50.5	52.7	53.7
Ambri	600	SSW	50.9	55.7	58.3	59.3
Giornico	600	WSW	57.2	63.1	65.8	66.9
Biasca	595	WSW	58.6	60.8	63.5	64.6
Riazzino	630	SSW	57.0	59.0	61.6	62.5
Melano	600	WSW	56.9	57.9	60.1	61.2

8.3 Berechnung des Sicherheitsbeiwerts

Der Sicherheitsbeiwert $\Delta_{\text{Sicherheit}}$ wird von den Bahninfrastrukturen unterschiedlich angesetzt. Üblicherweise liegt der Wert zwischen 5 bis 10 °C. Wie hoch der Wert für die Normalspurgleise in der Schweiz angesetzt ist, kann aufgrund der mangelnden Informationen nicht gesagt werden. Der einfachste Weg zur Bestimmung des Sicherheitsbeiwerts ist die Auswertung von historischen Lufttemperaturwerten zur Zeit der erstmaligen Definition der Neutralisationstemperatur von 25°C, resp. 28°C südlich Biasca um das Jahr 1967.

Die Berechnung der maximalen Schienentemperaturen mit den Formeln aus Kap. 6.3.5 auf Basis der historischen Lufttemperaturdaten um 1967 ergibt maximale Schienentemperaturen von 62°C und einen Mittelwert über alle maximalen Schienentemperaturen von 57.2°C. Lediglich an 9 von den 60 ausgewerteten Abschnitten wurden die Schienen wärmer als 60°C. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass zum Zeitpunkt der ersten Bestimmung der heute noch gültigen Neutralisationstemperatur (25°C) 60°C als maximale Schienentemperatur bestimmt wurde. Gemäss den AB-EBV ist die maximal zulässige Abweichung von der Neutralisationstemperatur (25°C) 40°C. Das bedeutet, dass das Gleis bis zur theoretischen Schienentemperatur von 65°C (25°C + 40°C) stabil bleibt. Zum Zeitpunkt dieser Bestimmung betrug die maximale Schienentemperatur 60°C. Der Sicherheitsbeiwert $\Delta_{\text{Sicherheit}}$ liegt demnach bei 5°C.

8.4 Berechnung der Neutralisationstemperatur

Mit der folgenden Formel wird die Neutralisationstemperatur berechnet:

$$T_n = \frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} + \Delta_{\text{Sicherheit}}$$

Die zukünftige Neutralisationstemperatur wurde unter Berücksichtigung von drei Varianten der minimalen Schienentemperatur für beide Klimaszenarien SSP1-2.6 und SSP5-8.5 berechnet. Die Berechnung der Neutralisationstemperatur nach Variante 1 berücksichtigt die künftige Eintrittswahrscheinlichkeit einer festgestellten Mindesttemperatur (gemeint ist der tiefste Wert über die Jahrzehnte einer Zeitperiode hinweg) und deckt zum Teil auch das Risiko von zu grossen Zugspannungen in der Schiene während einzelnen Extremereignissen ab. Die Berechnung nach Variante 2 berücksichtigt die unterschiedlichen Mindesttemperaturen ohne Risikominderung bei Extremereignissen. Die Berechnung nach Variante 3 basiert auf den bisherigen Erfahrungswerten. Es wird erwartet, dass die minimalen Temperaturen in Zukunft stetig steigen werden, deshalb wird bei allen drei Varianten die gegenwärtige Mindesttemperatur in die Berechnung aufgenommen. Die erwarteten höchsten Temperaturen unterscheiden sich zwischen den beiden zwei Szenarien um maximal 1°C (mit höheren Werten beim Szenario SSP5-8.5).

Tabelle 21: Neutralisationstemperatur mit Szenario SSP1-2.6

Ort	DfA-Linie Nr.	2000-2060 SSP126										
		T _{max, Schiene}	T _{n,min}	Variante 1			Variante 2			Variante 3		
				T _{min}	T _n	ΔT _{min-max}	T _{min}	T _n	ΔT _{min-max}	T _{min}	T _n	ΔT _{min-max}
Versoix	150	59.7	24.7	-9.2	30.2	73.9	-8.6	30.5	73.3	-15.0	27.3	79.7
Meyrin	151	62.8	27.8	-12.0	30.4	79.8	-8.3	32.3	76.1	-15.0	28.9	82.8
Allaman	150	58.3	23.3	-8.7	29.8	71.9	-4.0	32.1	67.3	-15.0	26.6	78.3
Rivaz	100	61.8	26.8	-11.6	30.1	78.3	-6.4	32.7	73.2	-15.0	28.4	81.8
Aigle	100	63.6	28.6	-13.4	30.1	81.9	-9.6	32.0	78.2	-15.0	29.3	83.6
St-Léonard	100	61.2	26.2	-12.7	29.2	78.9	-11.1	30.0	77.3	-15.0	28.1	81.2
Visp	100	65.1	30.1	-18.3	28.4	88.4	-14.7	30.2	84.8	-15.0	30.1	85.1
Eggerberg	300	61.8	26.8	-19.3	26.2	86.0	-15.6	28.1	82.4	-12.0	29.9	78.8
Aeschi b. S.	300	59.8	24.8	-14.5	27.7	79.3	-14.5	27.7	79.3	-15.0	27.4	79.8
Oey	320	56.3	21.3	-16.2	25.1	77.6	-14.0	26.2	75.3	-15.0	25.7	76.3
Einigen	310	59.2	24.2	-15.4	26.9	79.6	-11.1	29.1	75.3	-15.0	27.1	79.2
Wichtrach	290	62.9	27.9	-19.0	27.0	86.9	-12.8	30.1	80.7	-15.0	29.0	82.9
Penthalaz	200	63.7	28.7	-8.4	32.6	77.1	-3.8	34.9	72.5	-15.0	29.3	83.7
La Sarraz	200	65.4	30.4	-10.4	32.5	80.8	-6.3	34.5	76.7	-15.0	30.2	85.4
Le Day	200	58.5	23.5	-17.9	25.3	81.4	-13.7	27.4	77.2	-15.0	26.7	78.5
Yvonand	252	63.1	28.1	-9.8	31.7	77.9	-6.4	33.4	74.5	-15.0	29.1	83.1
Studen BE	260	62.8	27.8	-14.7	29.1	82.5	-9.2	31.8	77.0	-15.0	28.9	82.8
Kerzers	220	61.6	26.6	-16.4	27.6	82.9	-10.0	30.8	76.6	-15.0	28.3	81.6
Dompierre FR	251	60.6	25.6	-14.0	28.3	79.6	-9.5	30.5	75.1	-15.0	27.8	80.6
Corcelles p. P.	253	64.7	29.7	-15.2	29.8	84.9	-9.7	32.5	79.4	-15.0	29.8	84.7
Vuisternens d. R.	254	58.5	23.5	-15.6	26.4	79.1	-11.4	28.5	74.9	-15.0	26.7	78.5
Vauderens	250	56.0	21.0	-12.4	26.8	73.4	-8.1	28.9	69.1	-15.0	25.5	76.0
Düdingen	250	55.3	20.3	-18.4	23.5	78.7	-12.6	26.4	72.9	-15.0	25.2	75.3
Schwarzwasserbrücke	297	60.8	25.8	-16.1	27.4	81.9	-11.2	29.8	77.0	-15.0	27.9	80.8
Mühlethurnen	298	62.5	27.5	-16.7	27.9	84.2	-10.6	30.9	78.1	-15.0	28.7	82.5
Twann	210	58.6	23.6	-12.8	27.9	76.4	-10.0	29.3	73.6	-15.0	26.8	78.6
Noiraigue	219	59.3	24.3	-17.2	26.1	81.6	-12.5	28.4	76.8	-15.0	27.2	79.3
St - Imier	225	54.0	19.0	-20.3	21.9	79.3	-14.6	24.7	73.6	-15.0	24.5	74.0
Courgenay	240	62.0	27.0	-16.4	27.8	83.4	-11.4	30.3	78.4	-15.0	28.5	82.0
Delémont	226	64.4	29.4	-18.9	27.7	88.3	-13.1	30.6	82.5	-15.0	29.7	84.4
Münchenstein	230	63.1	28.1	-15.0	29.1	83.1	-9.1	32.0	77.2	-15.0	29.1	83.1
Liestal	500	63.2	28.2	-17.6	27.8	85.9	-12.0	30.6	80.2	-15.0	29.1	83.2
Wallbach	700	58.9	23.9	-12.9	28.0	76.8	-8.8	30.1	72.7	-15.0	27.0	78.9
Derendingen	415	63.4	28.4	-21.9	25.7	90.3	-14.9	29.2	83.3	-15.0	29.2	83.4
Oberburg	440	61.5	26.5	-17.1	27.2	83.5	-10.9	30.3	77.4	-15.0	28.2	81.5
Wiggen	460	57.4	22.4	-20.9	23.2	83.3	-14.8	26.3	77.2	-15.0	26.2	77.4
Wolhusen	460	61.0	26.0	-12.2	29.4	78.2	-7.9	31.6	73.9	-15.0	28.0	81.0
Zofingen	500	63.0	28.0	-18.0	27.5	86.0	-12.5	30.3	80.5	-15.0	29.0	83.0
Rupperswil	650	59.1	24.1	-16.2	26.4	80.3	-11.0	29.0	75.1	-15.0	27.0	79.1
Rietheim	701	62.2	27.2	-13.7	29.3	80.9	-8.2	32.0	75.4	-15.0	28.6	82.2
Spreitenbach	710	60.6	25.6	-15.1	27.7	80.7	-9.3	30.7	74.9	-15.0	27.8	80.6
Herrliberg	730	61.2	26.2	-11.7	29.8	77.9	-7.4	31.9	73.6	-15.0	28.1	81.2
Greifensee	740	61.5	26.5	-16.5	27.5	82.9	-9.6	30.9	76.1	-15.0	28.2	81.5
Andelfingen	762	61.8	26.8	-15.6	28.1	82.4	-9.5	31.2	76.3	-15.0	28.4	81.8
Weinfelden	840	59.7	24.7	-14.7	27.5	79.4	-9.9	29.9	74.6	-15.0	27.3	79.7
Guntershausen	850	58.7	23.7	-18.8	25.0	82.5	-11.7	28.5	75.4	-15.0	26.9	78.7
Sulgen	852	61.8	26.8	-12.9	29.4	79.7	-9.4	31.2	76.2	-15.0	28.4	81.8
Bütschwil	853	59.6	24.6	-18.8	25.4	83.4	-14.4	27.6	79.0	-15.0	27.3	79.6
Ebnat-Kappel	871	59.1	24.1	-18.3	25.4	82.4	-12.7	28.2	76.8	-15.0	27.1	79.1
Altmatt	673	56.2	21.2	-18.2	24.0	79.4	-13.3	26.5	74.5	-15.0	25.6	76.2
Rheineck	880	60.1	25.1	-11.1	29.5	76.2	-9.3	30.4	74.4	-15.0	27.6	80.1
Buchs SG	880	61.7	26.7	-16.3	27.7	83.0	-11.2	30.2	77.9	-15.0	28.3	81.7
Bad Ragaz	900	60.9	25.9	-16.3	27.3	82.2	-15.5	27.7	81.4	-15.0	28.0	80.9
Meggen	570	61.8	26.8	-14.4	28.7	81.2	-9.1	31.4	75.9	-15.0	28.4	81.8
Attinghausen	600	59.4	24.4	-14.6	27.4	79.0	-9.1	30.1	73.5	-15.0	27.2	79.4
Gurtellen	600	52.7	17.7	-15.4	23.7	73.2	-10.7	26.0	68.4	-15.0	23.9	72.7
Ambri	600	58.3	23.3	-18.6	24.9	81.8	-13.6	27.3	76.9	-15.0	26.6	78.3
Giornico	600	65.8	30.8	-5.5	35.2	76.3	-3.9	36.0	74.7	-15.0	30.4	85.8
Biasca	595	63.5	28.5	-10.7	31.4	79.1	-4.5	34.5	73.0	-12.0	30.7	80.5
Riazzino	630	61.6	26.6	0.2	35.9	66.4	1.8	36.7	64.8	-12.0	29.8	78.6
Melano	600	60.1	25.1	-5.9	32.1	71.1	-3.7	33.2	68.8	-12.0	29.1	77.1

Tabelle 22: Neutralisationstemperatur mit Szenario SSP5-8.5

Ort	DfA-Linie Nr.	2000-2060 SSP585										
		T _{max} , Schiene	T _{n,min}	Variante 1			Variante 2			Variante 3		
				T _{min}	T _n	ΔT _{min-max}	T _{min}	T _n	ΔT _{min-max}	T _{min}	T _n	ΔT _{min-max}
Versoix	150	60.6	25.6	-9.2	30.7	74.9	-8.6	31.0	74.2	-15.0	27.8	80.6
Meyrin	151	63.7	28.7	-12.0	30.9	80.7	-8.3	32.7	77.0	-15.0	29.4	83.7
Allaman	150	59.4	24.4	-8.7	30.3	73.1	-4.0	32.7	68.4	-15.0	27.2	79.4
Rivaz	100	62.8	27.8	-11.6	30.6	79.4	-6.4	33.2	74.2	-15.0	28.9	82.8
Aigle	100	64.8	29.8	-13.4	30.7	83.2	-9.6	32.6	79.4	-15.0	29.9	84.8
St-Léonard	100	62.2	27.2	-12.7	29.8	79.9	-11.1	30.6	78.3	-15.0	28.6	82.2
Visp	100	66.2	31.2	-18.3	29.0	89.5	-14.7	30.8	85.9	-15.0	30.6	86.2
Eggerberg	300	62.8	27.8	-19.3	28.8	87.1	-15.6	28.6	83.4	-12.0	30.4	79.8
Aeschi b. S.	300	60.9	25.9	-14.5	28.2	80.4	-14.5	28.2	80.4	-15.0	28.0	80.9
Oey	320	57.4	22.4	-16.2	25.6	78.6	-14.0	26.7	76.4	-15.0	26.2	77.4
Einigen	310	60.4	25.4	-15.4	27.5	80.7	-11.1	29.6	76.5	-15.0	27.7	80.4
Wichtrach	290	64.0	29.0	-17.8	28.1	86.8	-11.6	31.2	80.6	-15.0	29.5	84.0
Penthalaz	200	64.8	29.8	-8.4	33.2	78.2	-3.8	35.5	73.6	-15.0	29.9	84.8
La Sarraz	200	66.5	31.5	-10.4	33.0	81.9	-6.3	35.1	77.8	-15.0	30.7	86.5
Le Day	200	59.5	24.5	-17.9	25.8	82.4	-12.4	28.5	76.9	-15.0	27.2	79.5
Yvonand	252	64.2	29.2	-9.8	32.2	79.0	-6.4	33.9	75.6	-15.0	29.6	84.2
Studen BE	260	63.8	28.8	-14.7	29.6	83.5	-9.2	32.3	78.0	-15.0	29.4	83.8
Kerzers	220	62.6	27.6	-15.1	28.8	82.7	-9.2	31.7	76.8	-15.0	28.8	82.6
Dompierre FR	251	61.6	26.6	-14.0	28.8	80.6	-9.5	31.1	76.1	-15.0	28.3	81.6
Corcelles p. P.	253	65.8	30.8	-15.2	30.3	86.0	-9.7	33.1	80.5	-15.0	30.4	85.8
Vuisternens d. R.	254	59.5	24.5	-15.6	27.0	80.1	-11.4	29.1	75.9	-15.0	27.3	79.5
Vauderens	250	56.9	21.9	-12.4	27.3	74.3	-8.1	29.4	70.0	-15.0	26.0	76.9
Düdingen	250	56.3	21.3	-17.1	24.6	78.4	-11.3	27.5	72.6	-15.0	25.6	76.3
Schwarzwasserbrücke	297	61.9	26.9	-16.1	27.9	83.0	-11.2	30.4	78.1	-15.0	28.5	81.9
Mühlethurnen	298	63.6	28.6	-16.7	28.4	85.3	-10.6	31.5	79.2	-15.0	29.3	83.6
Twann	210	59.6	24.6	-12.8	28.4	77.4	-10.0	29.8	74.6	-15.0	27.3	79.6
Noiraique	219	60.4	25.4	-17.0	26.7	82.4	-11.7	29.3	77.1	-15.0	27.7	80.4
St - Imier	225	55.0	20.0	-20.3	22.4	80.3	-13.9	25.6	73.9	-15.0	25.0	75.0
Courgenay	240	63.1	28.1	-16.4	28.4	84.5	-11.4	30.9	79.5	-15.0	29.1	83.1
Delémont	226	65.4	30.4	-17.6	28.9	88.0	-11.8	31.8	82.2	-15.0	30.2	85.4
Münchenstein	230	64.1	29.1	-15.0	29.6	84.1	-9.1	32.5	78.2	-15.0	29.6	84.1
Liestal	500	64.2	29.2	-16.3	29.0	85.5	-10.6	31.8	79.8	-15.0	29.6	84.2
Wallbach	700	59.9	24.9	-12.9	28.5	77.7	-8.8	30.5	73.7	-15.0	27.4	79.9
Derendingen	415	64.5	29.5	-20.5	27.0	90.0	-13.5	30.5	83.0	-15.0	29.7	84.5
Oberburg	440	62.6	27.6	-17.1	27.8	84.7	-10.3	31.1	77.9	-15.0	28.8	82.6
Wiggen	460	58.5	23.5	-19.6	24.4	83.1	-13.5	27.5	77.0	-15.0	26.7	78.5
Wolhusen	460	62.1	27.1	-12.2	30.0	79.4	-7.9	32.1	75.0	-15.0	28.6	82.1
Zofingen	500	64.0	29.0	-16.7	28.7	85.7	-11.1	31.5	80.1	-15.0	29.5	84.0
Rupperswil	650	60.0	25.0	-14.9	27.5	79.9	-9.7	30.1	74.7	-15.0	27.5	80.0
Rietheim	701	63.2	28.2	-13.7	29.8	81.9	-8.2	32.5	76.4	-15.0	29.1	83.2
Spreitenbach	710	61.6	26.6	-13.7	28.9	80.3	-8.8	31.4	75.4	-15.0	28.3	81.6
Herrliberg	730	62.2	27.2	-11.7	30.3	78.9	-7.4	32.4	74.6	-15.0	28.6	82.2
Greifensee	740	62.6	27.6	-16.5	28.1	84.1	-9.4	31.6	77.0	-15.0	28.8	82.6
Andelfingen	762	62.8	27.8	-15.6	28.6	83.4	-9.5	31.7	77.3	-15.0	28.9	82.8
Weinfelden	840	60.6	25.6	-14.5	28.1	80.1	-8.9	30.9	74.5	-15.0	27.8	80.6
Guntershausen	850	59.7	24.7	-17.5	26.1	82.1	-10.4	29.6	75.1	-15.0	27.3	79.7
Sulgen	852	62.8	27.8	-12.9	29.9	80.7	-9.4	31.7	77.2	-15.0	28.9	82.8
Bütschwil	853	60.6	25.6	-17.5	26.5	83.1	-13.1	28.7	78.7	-15.0	27.8	80.6
Ebnat-Kappel	871	60.2	25.2	-17.0	26.6	82.2	-11.4	29.4	76.6	-15.0	27.6	80.2
Altmatt	673	57.2	22.2	-18.2	24.5	80.4	-13.3	27.0	75.5	-15.0	26.1	77.2
Rheineck	880	61.4	26.4	-11.1	30.1	77.4	-9.3	31.0	75.7	-15.0	28.2	81.4
Buchs SG	880	62.7	27.7	-16.3	28.2	84.0	-11.0	30.8	78.7	-15.0	28.8	82.7
Bad Ragaz	900	61.9	26.9	-16.3	27.8	83.2	-15.5	28.2	82.4	-15.0	28.5	81.9
Meggen	570	62.9	27.9	-14.4	29.3	82.3	-7.8	32.6	75.7	-15.0	29.0	82.9
Attinghausen	600	60.5	25.5	-14.6	27.9	80.1	-8.0	31.2	73.5	-15.0	27.7	80.5
Gurtellen	600	53.7	18.7	-15.4	24.1	74.1	-10.7	26.5	69.4	-15.0	24.3	73.7
Ambri	600	59.3	24.3	-18.6	25.4	82.9	-13.1	28.1	77.4	-15.0	27.2	79.3
Giornico	600	66.9	31.9	-5.5	35.7	77.4	-3.9	36.5	75.8	-15.0	31.0	86.9
Biasca	595	64.6	29.6	-10.7	32.0	80.2	-4.5	35.0	74.1	-12.0	31.3	81.6
Riazzino	630	62.5	27.5	0.2	36.4	67.3	1.8	37.2	65.7	-12.0	30.3	79.5
Melano	600	61.2	26.2	-5.9	32.7	72.2	-3.7	33.8	69.9	-12.0	29.6	78.2

Aufgrund der aktuellen klimatischen Trends kann davon ausgegangen werden, dass das pessimistische Szenario eintreffen wird (SSP5-8.5). Für die Bestimmung der zukünftigen Neutralisationstemperatur werden sich deshalb die Berechnungen an dem pessimistischen Szenario SSP5-8.5 orientieren müssen.

Werden die berechneten Neutralisationstemperaturen nach allen drei Varianten in der Tabelle 22 näher betrachtet, so fällt auf, dass diese sich unter den drei Berechnungsvarianten um 7 bis 14°C unterscheiden. Die einzelnen Werte können aber gegebenenfalls angepasst werden, sofern die Mindestneutralisationstemperatur $T_{n,min}$ nicht unterschritten wird und auch die maximal zulässige Temperaturdifferenz von T_{min} und T_{max} zur Neutralisationstemperatur von 40°C nicht überschritten

wird. In Tabelle 22 sind alle Überschreitungen von $\Delta T_{\min-\max}$ ($2 \times 40^\circ\text{C} = 80^\circ\text{C}$) mit roter Farbe hervorgehoben.

Aufgrund der dünnen Datengrundlage aus den 60er Jahren im Vergleich zu den umfassenden Daten aus den gegenwärtigen Untersuchungen, werden für die Bestimmung der zukünftigen Neutralisationstemperatur die Berechnungen nach Variante 1 verwendet. So entstehen auf der einen Seite je nach Ort im Vergleich zu Varianten 2 und 3 grössere ΔT_{\max} bei Kälte ($> 40^\circ\text{C}$ Zugspannung), auf der anderen Seite können eventuelle Problemzonen bei sehr kalten Wetterereignissen im Schienennetz genau ausgewiesen werden. Es ist in jedem Fall darauf zu achten, dass die Mindestneutralisationstemperatur $T_{n,\min}$ für alle Abschnitte eingehalten wird. Falls dies vereinzelt nicht möglich sein sollte, so darf die Mindestneutralisationstemperatur auf jeden Fall nie um mehr als 5°C (Sicherheitsbeiwert) unterschritten werden und es sind für den betroffenen Abschnitt zusätzliche Massnahmen zu definieren die einen Schutz gegen Gleisdeformationen ermöglichen.

In den Tabellen 23 und 24 werden zwei Szenarien zur Neutralisationstemperatur dargestellt.

- Tabelle 23: Beibehaltung der aktuellen Vorgaben von 25°C , resp. 28°C Neutralisationstemperatur
- Tabelle 24: Erhöhung der Neutralisationstemperatur

In beiden Tabellen 23 und 24 sind in der Spalte $\Delta T_{\min, T_n}$ die Überschreitungen der T_{\min} bis T_n von 40°C blau markiert.

In der Spalte $T_{n,\min}$ sind alle Unterschreitungen der Mindestneutralisationstemperatur $T_{n,\min}$ farblich gekennzeichnet:

- Gelbe Farbe: Unterschreitung $\leq 2^\circ\text{C}$
- Orange Farbe: Unterschreitung $3 \leq 5^\circ\text{C}$
- Rote Farbe: Unterschreitung $> 5^\circ\text{C}$

Tabelle 23: Szenario Beibehaltung aktuelle Neutralisationstemperatur

Ort	DfA-Linie Nr.	Exponierung Schienen	Infrastruktur	T _n aktuell	Neutralisationstemperatur T _n Strategie bisher			
					Variante 1			
					T _{n,min}	T _{n, v1}	T _n	ΔT _{min, T_n}
Versoix	150	OSO	SBB	25	25.6	30.7	25.0	34.2
Meyrin	151	SSO	SBB	25	28.7	30.9	25.0	37.0
Allaman	150	SSO	SBB	25	24.4	30.3	25.0	33.7
Rivaz	100	SSW	SBB	25	27.8	30.6	25.0	36.6
Aigle	100	WSW	SBB	25	29.8	30.7	25.0	38.4
St-Léonard	100	SSO	SBB	25	27.2	29.8	25.0	37.7
Visp	100	SW	SBB	25	31.2	29.0	25.0	43.3
Eggerberg	300	SSW	BLS	28	27.8	26.8	28.0	47.3
Aeschi b. S.	300	WSW	BLS	25	25.9	28.2	25.0	39.5
Oey	320	SSO	BLS	25	22.4	25.6	25.0	41.2
Einigen	310	SW	BLS	25	25.4	27.5	25.0	40.4
Wichtrach	290	WSW	SBB	25	29.0	28.1	25.0	42.8
Penthalaz	200	WSW	SBB	25	29.8	33.2	25.0	33.4
La Sarraz	200	SW	SBB	25	31.5	33.0	25.0	35.4
Le Day	200	SSO	SBB	25	24.5	25.8	25.0	42.9
Yvonand	252	SSW	SBB	25	29.2	32.2	25.0	34.8
Studen BE	260	WSW	SBB	25	28.8	29.6	25.0	39.7
Kerzers	220	SSW	BLS	25	27.6	28.8	25.0	40.1
Dompierre FR	251	SSO	SBB	25	26.6	28.8	25.0	39.0
Corcelles p. P.	253	SW	SBB	25	30.8	30.3	25.0	40.2
Vuisternens d. R.	254	SSW	TPF	25	24.5	27.0	25.0	40.6
Vauderens	250	OSO	SBB	25	21.9	27.3	25.0	37.4
Düdingen	250	OSO	SBB	25	21.3	24.6	25.0	42.1
Schwarzwasserbrücke	297	SW	BLS	25	26.9	27.9	25.0	41.1
Mühlethurnen	298	WSW	BLS	25	28.6	28.4	25.0	41.7
Twann	210	SSO	SBB	25	24.6	28.4	25.0	37.8
Noiraigue	219	SSW	SBB	25	25.4	26.7	25.0	42.0
St - Imier	225	SSO	SBB	25	20.0	22.4	25.0	45.3
Courgenay	240	WSW	SBB	25	28.1	28.4	25.0	41.4
Delémont	226	WSW	SBB	25	30.4	28.9	25.0	42.6
Münchenstein	230	WSW	SBB	25	29.1	29.6	25.0	40.0
Liestal	500	WSW	SBB	25	29.2	29.0	25.0	41.3
Wallbach	700	SSW	SBB	25	24.9	28.5	25.0	37.9
Derendingen	415	SW	SBB	25	29.5	27.0	25.0	45.5
Oberburg	440	WSW	BLS	25	27.6	27.8	25.0	42.1
Wiggen	460	WSW	SBB	25	23.5	24.4	25.0	44.6
Wolhusen	460	SW	SBB	25	27.1	30.0	25.0	37.2
Zofingen	500	WSW	SBB	25	29.0	28.7	25.0	41.7
Ruppertswil	650	SSO	SBB	25	25.0	27.5	25.0	39.9
Riethem	701	WSW	SBB	25	28.2	29.8	25.0	38.7
Spreitenbach	710	SSW	SBB	25	26.6	28.9	25.0	38.7
Herrliberg	730	WSW	SBB	25	27.2	30.3	25.0	36.7
Greifensee	740	SW	SBB	25	27.6	28.1	25.0	41.5
Andelfingen	762	WSW	SBB	25	27.8	28.6	25.0	40.6
Weinfelden	840	SSW	SBB	25	25.6	28.1	25.0	39.5
Guntershausen	850	SSW	SBB	25	24.7	26.1	25.0	42.5
Sulgen	852	SW	SBB	25	27.8	29.9	25.0	37.9
Bütschwil	853	WSW	SBB	25	25.6	26.5	25.0	42.5
Ebnat-Kappel	871	WSW	SOB	25	25.2	26.6	25.0	42.0
Altmatt	673	WSW	SOB	25	22.2	24.5	25.0	43.2
Rheineck	880	WSW	SBB	25	26.4	30.1	25.0	36.1
Buchs SG	880	WSW	SBB	25	27.7	28.2	25.0	41.3
Bad Ragaz	900	SW	SBB	25	26.9	27.8	25.0	41.3
Meggen	570	WSW	SBB	25	27.9	29.3	25.0	39.4
Attinghausen	600	WSW	SBB	25	25.5	27.9	25.0	39.6
Gurtellen	600	OSO	SBB	25	18.7	24.1	25.0	40.4
Ambri	600	SSW	SBB	25	24.3	25.4	25.0	43.6
Giornico	600	WSW	SBB	25	31.9	35.7	25.0	30.5
Biasca	595	WSW	SBB	28	29.6	32.0	28.0	38.7
Riazzino	630	SSW	SBB	28	27.5	36.4	28.0	27.8
Melano	600	WSW	SBB	28	26.2	32.7	28.0	33.9

Tabelle 24: Szenario Erhöhung aktuelle Neutralisationstemperatur

Ort	DfA-Linie Nr.	Exponierung Schienen	Infrastruktur	T _n aktuell	Neutralisationstemperatur T _n Strategie neu			
					Variante 1			
					T _{n,min}	T _{n, V1}	T _n	ΔT _{min, T_n}
Verseix	150	OSO	SBB	25	25.6	30.7	28.0	37.2
Meyrin	151	SSO	SBB	25	28.7	30.9	28.0	40.0
Allaman	150	SSO	SBB	25	24.4	30.3	28.0	36.7
Rivaz	100	SSW	SBB	25	27.8	30.6	28.0	39.6
Aigle	100	WSW	SBB	25	29.8	30.7	28.0	41.4
St-Léonard	100	SSO	SBB	25	27.2	29.8	28.0	40.7
Visp	100	SW	SBB	25	31.2	29.0	28.0	46.3
Eggerberg	300	SSW	BLS	28	27.8	26.8	28.0	47.3
Aeschi b. S.	300	WSW	BLS	25	25.9	28.2	28.0	42.5
Oey	320	SSO	BLS	25	22.4	25.6	28.0	44.2
Einigen	310	SW	BLS	25	25.4	27.5	28.0	43.4
Wichtrach	290	WSW	SBB	25	29.0	28.1	28.0	45.8
Penthalaz	200	WSW	SBB	25	29.8	33.2	28.0	36.4
La Sarraz	200	SW	SBB	25	31.5	33.0	28.0	38.4
Le Day	200	SSO	SBB	25	24.5	25.8	28.0	45.9
Yvonand	252	SSW	SBB	25	29.2	32.2	28.0	37.8
Studen BE	260	WSW	SBB	25	28.8	29.6	28.0	42.7
Kerzers	220	SSW	BLS	25	27.6	28.8	28.0	43.1
Dompierre FR	251	SSO	SBB	25	26.6	28.8	28.0	42.0
Corcelles p. P.	253	SW	SBB	25	30.8	30.3	28.0	43.2
Vuisternens d. R.	254	SSW	TPF	25	24.5	27.0	28.0	43.6
Vauderens	250	OSO	SBB	25	21.9	27.3	28.0	40.4
Düdingen	250	OSO	SBB	25	21.3	24.6	28.0	45.1
Schwarzwasserbrücke	297	SW	BLS	25	26.9	27.9	28.0	44.1
Mühlethurnen	298	WSW	BLS	25	28.6	28.4	28.0	44.7
Twann	210	SSO	SBB	25	24.6	28.4	28.0	40.8
Noiraigue	219	SSW	SBB	25	25.4	26.7	28.0	45.0
St - Imier	225	SSO	SBB	25	20.0	22.4	28.0	48.3
Courgenay	240	WSW	SBB	25	28.1	28.4	28.0	44.4
Delémont	226	WSW	SBB	25	30.4	28.9	28.0	45.6
Münchenstein	230	WSW	SBB	25	29.1	29.6	28.0	43.0
Liestal	500	WSW	SBB	25	29.2	29.0	28.0	44.3
Wallbach	700	SSW	SBB	25	24.9	28.5	28.0	40.9
Derendingen	415	SW	SBB	25	29.5	27.0	28.0	48.5
Oberburg	440	WSW	BLS	25	27.6	27.8	28.0	45.1
Wiggen	460	WSW	SBB	25	23.5	24.4	28.0	47.6
Wolhusen	460	SW	SBB	25	27.1	30.0	28.0	40.2
Zofingen	500	WSW	SBB	25	29.0	28.7	28.0	44.7
Ruppertswil	650	SSO	SBB	25	25.0	27.5	28.0	42.9
Rietheim	701	WSW	SBB	25	28.2	29.8	28.0	41.7
Spreitenbach	710	SSW	SBB	25	26.6	28.9	28.0	41.7
Herrliberg	730	WSW	SBB	25	27.2	30.3	28.0	39.7
Greifensee	740	SW	SBB	25	27.6	28.1	28.0	44.5
Andelfingen	762	WSW	SBB	25	27.8	28.6	28.0	43.6
Weinfeldern	840	SSW	SBB	25	25.6	28.1	28.0	42.5
Guntershausen	850	SSW	SBB	25	24.7	26.1	28.0	45.5
Sulgen	852	SW	SBB	25	27.8	29.9	28.0	40.9
Bütschwil	853	WSW	SBB	25	25.6	26.5	28.0	45.5
Ebnat-Kappel	871	WSW	SOB	25	25.2	26.6	28.0	45.0
Altmatt	673	WSW	SOB	25	22.2	24.5	28.0	46.2
Rheineck	880	WSW	SBB	25	26.4	30.1	28.0	39.1
Buchs SG	880	WSW	SBB	25	27.7	28.2	28.0	44.3
Bad Ragaz	900	SW	SBB	25	26.9	27.8	28.0	44.3
Meggen	570	WSW	SBB	25	27.9	29.3	28.0	42.4
Attinghausen	600	WSW	SBB	25	25.5	27.9	28.0	42.6
Gurtellen	600	OSO	SBB	25	18.7	24.1	28.0	43.4
Ambri	600	SSW	SBB	25	24.3	25.4	28.0	46.6
Giornico	600	WSW	SBB	25	31.9	35.7	31.0	36.5
Biasca	595	WSW	SBB	28	29.6	32.0	31.0	41.7
Riazzino	630	SSW	SBB	28	27.5	36.4	31.0	30.8
Melano	600	WSW	SBB	28	26.2	32.7	31.0	36.9

Unter Beibehaltung der aktuellen Vorgaben zur Neutralisationstemperatur (Tabelle 23), würde auf über 75% aller 61 betrachteten Abschnitte die notwendige Mindestneutralisationstemperatur unterschritten, auf 50% aller Abschnitte um mehr als 2°C. In gut 10% der Fälle läge die Unterschreitung bei >5°C. Hitzebedingte Gleisdeformationen wären an solchen Stellen zukünftig besonders hoch wahrscheinlich. Diese Erkenntnis verdeutlicht noch einmal die Notwendigkeit der Anpassung der Vorgabe zur Neutralisationstemperatur zur Gewährleistung der Gleisstabilität aufgrund der fortschreitenden Klimaerwärmung.

Tabelle 24 zeigt das Szenario bei Erhöhung der Neutralisationstemperatur auf netzweit 28°C (ausgenommen Tessin südlich Lavorgo auf 31°C). Dabei wird deutlich sichtbar, dass die Anzahl der Unterschreitungen der Mindestneutralisationstemperatur $T_{n,min}$ auf 17 (rund 25% aller betrachteten Abschnitte) sinkt. Auf 13 Abschnitten liegt die Unterschreitung bei maximal 2°C und auf 4 Abschnitten bei max. 3.5°C.

Werden die Temperaturdifferenzen zwischen den minimalen Schienentemperaturen und der Neutralisationstemperatur in Tabelle 24 betrachtet, fällt auf, dass die maximale Temperaturabweichung von 40°C gem. AB-EBV in vielen Fällen überschritten wird (blau markiert). Die Gründe dafür liegen zum einen in der, im Vergleich zu heute, veränderten Definition der minimalen Schienentemperatur (effektive Werte bezogen auf den jeweiligen Abschnitt und nicht gemittelter Wert über das gesamte Bahnnetz). Zum anderen steigen die maximalen Schienentemperaturen mit zunehmender Klimaerwärmung mehr an als die tiefsten Schienentemperaturen. Das heisst die Bandbreite der Schienentemperatur nimmt zu. Diese Überschreitungen bedeuten aber nicht, dass dort die Schienen bei Erhöhung der Neutralisationstemperatur systematisch brechen werden. Schienen halten weit mehr als die Zugspannung, verursacht durch einen Temperaturunterschied von 40°C zur Neutralisationstemperatur, aus. Das kritische Element im Gleis in Bezug auf Zugspannungen in der Schiene sind immer die Schweissungen. Falls eine Schweissung in mangelhafter Qualität vorliegt, kann diese bei hoher Zugspannung brechen. Bei Erhöhung der Neutralisationstemperatur ist es demnach möglich, dass die Anzahl Schienenbrüche in Schweissungen leicht ansteigt. Aufgrund der aktuellen Verteilung Schienenbrüche zu Gleisdeformationen wäre dies sogar gewünscht, denn eine Erhöhung der Neutralisationstemperatur bewirkt mit Sicherheit eine Reduktion der Anzahl Gleisdeformationen.

Auf den 4 Abschnitten mit Unterschreitung der Mindestneutralisationstemperatur $T_{n,min}$ von max. 3.5°C (Visp, La Sarraz, Corcelles p. P. und Delémont) bleibt das Gleis bei maximalen Schienentemperaturen stabil, jedoch ist der Sicherheitsbeiwert $\Delta_{\text{Sicherheit}}$ stark reduziert. Zur Erhöhung der Gleisstabilität auf den vier Abschnitten wird empfohlen, schweren Oberbau mit Betonschwellen und verstärktem Schotterbett zu verwenden. Auf Schienen mit Profil EN 54E2 sollte, wenn möglich, verzichtet werden.

In den nachfolgenden vier Kartenausschnitten (Abbildung 42) sind die vier Gleisabschnitte mit zusätzlich erforderlichen Massnahmen zur Erhöhung der Gleislagesicherheit schwarz umkreist.

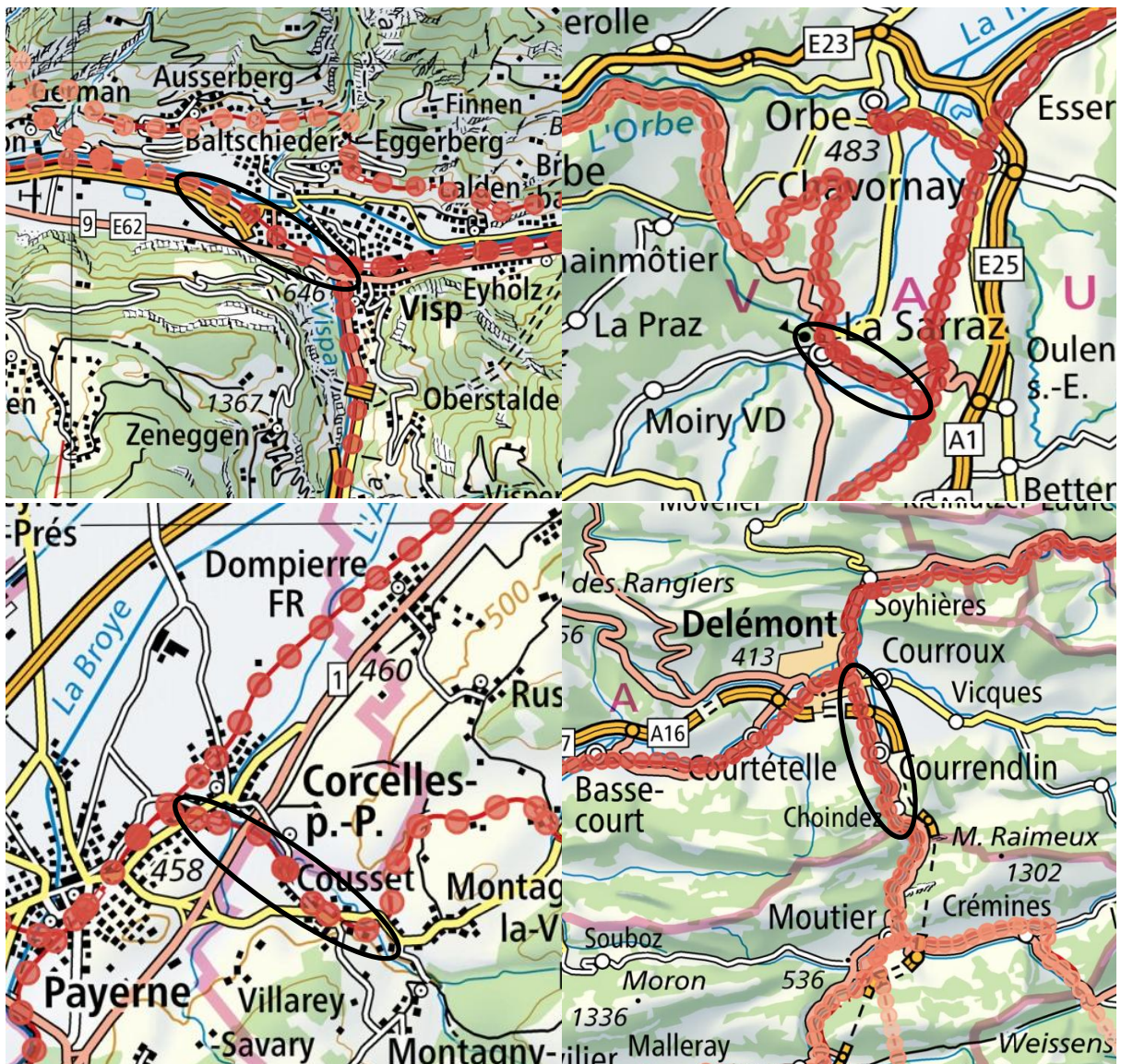


Abbildung 42: Streckenabschnitte mit zusätzlich erforderlichen Massnahmen zur Gewährleistung der Gleislagesicherheit

8.5 Einfluss von Restwärme aus dem Schotterbett auf die maximale Schienentemperatur

Im Umfang der permanenten Schienentemperaturmessungen im Gleis wurden auch die Schottertemperaturen (Mitte Schotterbett und Planie) gemessen. Dabei sollte untersucht werden, ob die Schienentemperatur während einer sommerlichen Hitzeperiode von Tag zu Tag wärmer wird, d. h. durch die nächtliche Restwärme im Schotterbett warmgehalten wird und darum die Schienentemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur stärker ansteigt. Die Auswertung einer solchen Hitzeperiode in Visp Ende Sommer 2023 (Abbildung 43) zeigt aber gut auf, dass aufgrund nächtlicher Restwärme die Schienen zwar warmgehalten werden, d. h. nicht das Niveau der Lufttemperatur erreichen, dies jedoch keinen Einfluss auf die maximale Schienentemperatur am Tag hat.

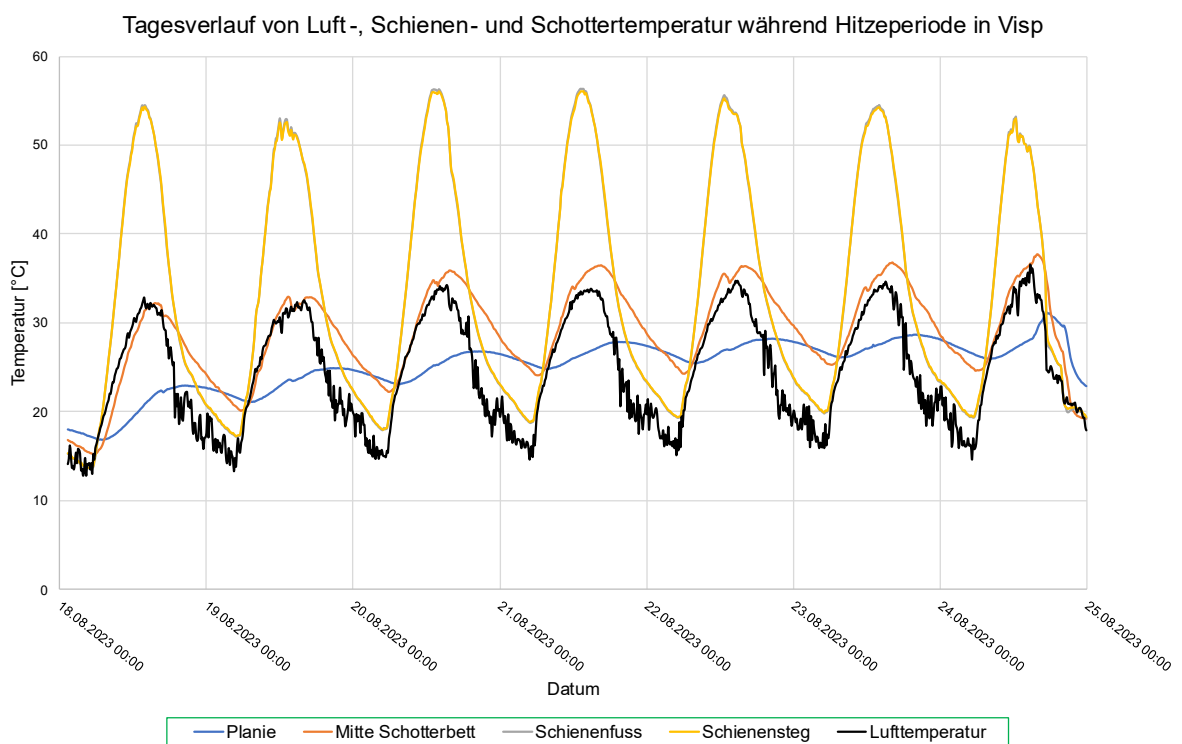


Abbildung 43: Schienen- und Schottertemperaturverlauf während Hitzeperiode im Sommer

9 Fazit

Eine Schiene wird bei gleicher Sonneneinstrahlung je nach Ausrichtung der Exponierung unterschiedlich heiss, diejenige mit Ausrichtung West-Südwest am heissesten. Der tiefste Wärmeeintrag erfolgt in einer Ost-Südost-exponierten Schiene.

Ebenso unterscheidet sich je nach Exponierung die Tageszeit, zu der die Schiene am heissesten wird.

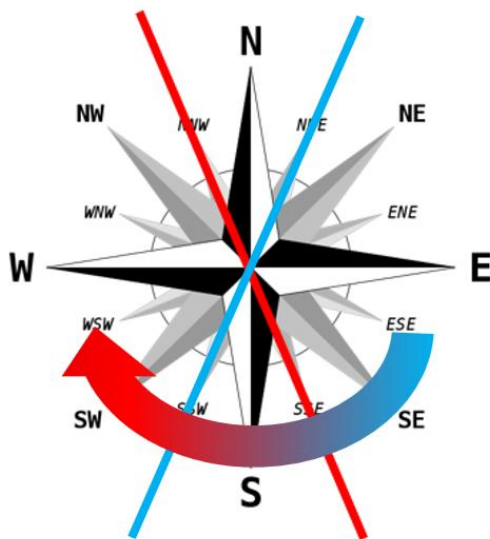


Abbildung 44: Darstellung unterschiedliche Schienentemperaturen bei unterschiedlichen Exponierungen

Anhand der Temperaturdaten aus dem Projekt zur permanenten Schienentemperaturmessung an den sieben Standorten im Netz der SBB und den Handmessungen im Gleis an vier Standorten konnten Funktionen für die maximale Schienentemperatur bei unterschiedlichen maximalen Lufttemperaturen und Exponierungen der Schienen hergeleitet werden.

Zurzeit ist das lückenlose Gleis mit den aktuell vorgegebenen Neutralisationstemperaturen stabil. Für die Gewährleistung der Sicherheit des lückenlosen Gleises auch in langfristiger Zukunft, sollten die Vorgaben an die Klimatrends und andere Einflüsse auf die Schienentemperaturen (Exponierung, Schienenprofil...) angepasst werden, um hitzebedingte Deformationen an Gleisen zukünftig zu verhindern.

Mit der Anpassung der Vorgabe zur Neutralisationstemperatur werden genau genommen folgende Ziele verfolgt:

- Gewährleistung der Gleisstabilität in Gegenwart und in Zukunft
- Möglichst einheitliche Vorgabe zur Reduktion der Fehleranfälligkeit
- Aufzeigen eventueller Hotspots (ΔT zu $T_n > 40^\circ\text{C}$) inkl. Benennung möglicher Massnahmen

Die zukünftige Neutralisationstemperatur wurde aufgrund der aktuellen klimatischen Trends nach dem Klimaszenario SSP5-8.5 berechnet, wobei für die minimale Schienentemperatur eine Variante mit Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines sehr kalten Wetterereignisses gewählt wurde.

Vorschlag zur Änderung der Neutralisationstemperatur zusammengefasst:

- Alpennordseite inkl. Wallis: $T_n = 28^{\circ}\text{C}$
- Alpensüdseite nördlich Lavorgo: $T_n = 28^{\circ}\text{C}$
- Alpensüdseite südlich Lavorgo: $T_n = 31^{\circ}\text{C}$

Die Ausführungstoleranz von +/- 3°C zur Neutralisationstemperatur bleibt wie bisher.

Die komplette Neutralisierung eines Bahninfrastrukturnetzes in der Grösse des Netzes der SBB dauert rund 30 bis 40 Jahre, da sämtliche Neutralisierungen nach den neuen Vorgaben im Umfang von geplantem Unterhalt und Fahrbahnerneuerungen erfolgen. Zur Gewährleistung eines stabilen Gleises in der Gegenwart und auch in der Zukunft wird empfohlen, die Änderung der Neutralisationstemperatur möglichst zeitnah im Regelwerk zu implementieren und für den Bau des lückenlosen Gleises freizugeben.

10 Literaturverzeichnis

Autor, A. (Jahr). *Titel*. Ort: Verleger.

BAV, B. f. (2024). *Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung AB-EBV*. BAV.

Braess, H. P. (2018). *Sicherstellung einer langfristig guten Gleislage in atmenden Bögen*. ETH Zürich.

Lichtberger, B. (2010). *Handbuch Gleis*. DVV Media Group GmbH / Eurailpress.

Prager, G. (2007). *Messungen am Eisenbahnoberbau – Habilitationsschrift*. Universität Innsbruck.

VöV, A. (2019). *R RTE 22041 Lückenlose und verlaschte Gleise und Weichen, Normalspur*. Verband öffentlicher Verkehr VöV.

Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit*. Prag: Dominicus.

11 Anhang: Abschlussbericht Schientemperaturmessungen InfraMT



Bericht 23-126-2 Neutralisationstemperatur

Projektleitung infraMT Giuliano Soldati
Besteller SBB AG
 I-NAT-FW-TAFB-TRP
 Lukas Rössler
 Hilfikerstrasse 3
 CH-3000 Bern 65

Version 1.1
Versionsdatum 27.10.2025
Messkampagne 2023 - 2025

Version	Autor	Information / Ergänzung	geprüft
1.0, 08.10.2025	D. Rohrer	Grundversion	G. Soldati, 20.10.2025
1.1, 27.10.2025	M. Heimberg	Ergänzung mit Diagramme $T_{\text{Schiene}} = f(T_{\text{Standort}})$	G. Soldati, 28.10.2025

Urheberrecht: Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Jegliche kommerzielle Nutzung bedarf einer vorgängigen, ausdrücklichen Genehmigung.

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	3
2.	Auftrag	4
	Ausgangslage	4
3.	Versuchsaufbau	5
3.1.	Thurbrücke	5
3.2.	Pratteln	7
3.3.	Basel PB	9
3.4.	Visp	10
3.5.	Chiasso	11
3.6.	Lugano	13
3.7.	Luzern	14
3.8.	Messgeräte und Messunsicherheit	15
3.8.1.	Temperatursensoren	15
3.8.2.	Datalogger	15
4.	Messprogramm	15
5.	Resultate	15
5.1.	Auswertung	15
5.2.	Messstandorte	16
5.2.1.	Thurbrücke	16
5.2.2.	Pratteln	19
5.2.3.	Basel PB	22
5.2.4.	Visp	25
5.2.5.	Chiasso	28
5.2.6.	Lugano	32
5.2.7.	Luzern	35
6.	Schlussfolgerung	38
A.	Anhangsverzeichnis	39
B.	Abkürzungsverzeichnis	39
C.	Abbildungsverzeichnis	39
D.	Tabellenverzeichnis	40

1. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Messkampagne wurde an sieben Standorten in der Schweiz – Thurbrücke, Pratteln, Basel PB, Visp, Chiasso, Lugano und Luzern – die Schienentemperatur über einen Zeitraum von zwei Jahren aufgezeichnet. Ziel der Untersuchung war die Erfassung der maximalen und minimalen Schienentemperaturen zur Überprüfung und allfälligen Neufestlegung der Neutralisationstemperatur.

Die Messungen erfolgten zwischen Sommer 2023 und Herbst 2025 mit jeweils vier im Gleis installierten Temperatursensoren (Schienenfuss, Schienensteg, zwei im Schotterbett) sowie einem zusätzlichen Lufttemperatursensor ab 2024. Die Daten wurden im 10-Minuten-Intervall erfasst und in einer Cloud-Datenbank gespeichert. Für die Auswertung wurden ausschliesslich Tagesmaxima an Schönwettertagen berücksichtigt, da diese den grössten Temperatureinfluss auf die Schiene verursachen.

Bei sonnigen Bedingungen liegt die Lufttemperatur in Gleisnähe im Mittel etwa 2.4 °C über den Werten der nächstgelegenen Wetterstationen. Die Schienentemperaturen erreichten je nach Standort maximale Werte zwischen 52 °C und 58 °C sowie minimale zwischen -11 °C und -6 °C, was einer thermischen Spannweite von rund 65 bis 68 °C entspricht, siehe Abbildung 1. Bei den maximalen Werten lagen die gleichzeitigen Lufttemperaturen zwischen 33 °C und 36 °C.

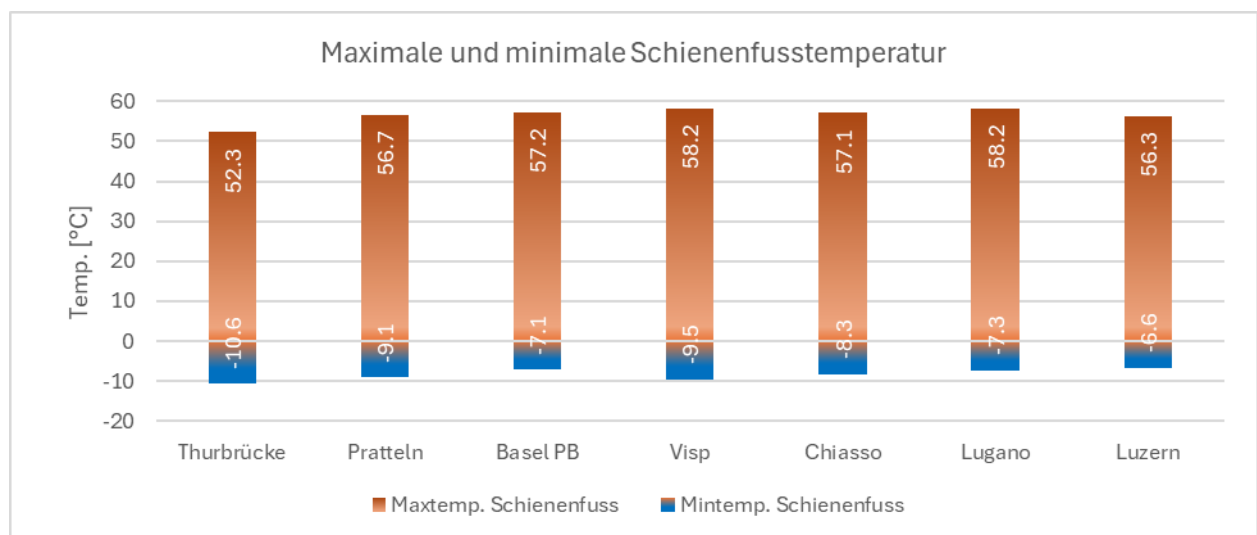


Abbildung 1 Max. und min. Schienenfusstemperatur

Die Auswertung zeigt einen stabilen linearen Zusammenhang zwischen Luft- und Schienentemperatur. Dieser Zusammenhang ist standortübergreifend vergleichbar und bestätigt die Konsistenz der Messungen. In Chiasso wurde zusätzlich eine Referenzschiene instrumentiert, deren Messwerte die Ergebnisse der Betriebsschiene mit geringen Abweichungen bestätigten.

Die Analyse der Messpositionen ergab, dass die Unterseite des Schienenfusses die zuverlässigsten Temperaturwerte liefert. Bei Messungen in der Nacht oder ohne direkte Sonneneinstrahlung kann jedoch auch am Schienensteg gemessen werden, wobei ein taktiles Thermometer gegenüber Infrarotmessungen zu bevorzugen ist.

Die erhobenen Daten bilden eine verlässliche Grundlage für die Beurteilung der Neutralisationstemperatur und können für zukünftige Analysen und Anpassungen von Schienenspannungszuständen im Netz der SBB herangezogen werden.

2. Auftrag

Ausgangslage

An fünf ausgewählten Standorten, in verschiedenen Regionen der Schweiz, soll ab dem Sommer 2023 die Schientemperatur während einem Jahr aufgezeichnet werden. Ziel der Messung ist die Erfassung der maximalen und minimalen Schientemperaturen zwecks Kontrolle bzw. neuer Festlegung der Neutralisationstemperatur.

Nach rund einem Jahr Messdauer wird die Messkampagne im August 2024 um ein weiteres Jahr bis Ende August 2025 verlängert.

Die bestehenden Sensoren werden auf Kundenwunsch ab 2024 mit einem Lufttemperatursensor ergänzt.

Zusätzlich werden im Mai 2024 zwei weitere Messstationen in Gleisen mit Stahlschwellen im Raum Luzern und Lugano, eingerichtet.

Die ausgewählten Standorte sind:

• Thurbrücke	Gleis 516	km 17.300
• Pratteln - Frenkendorf	Gleis 109	km 10.710
• Basel PB	W 333	km 0.500
• St. German - Visp	Gleis 114	km 133.650
• Chiasso	Gleis 563	km 205.800
• Lugano	Gleis 508	km 7.880
• Luzern	Gleis 375	km 175.700

An den sieben Standorten werden insgesamt vier Temperatursonden im Gleis installiert: eine an der Unterseite des Schienenfusses, eine in einer Bohrung auf Höhe der neutralen Achse im Schienensteg sowie zwei im Schotterbett in unterschiedliche Tiefen.

Der Lufttemperatursensor wird auf einer Höhe von zwei Metern unmittelbar neben dem Gleis in einem weissen und belüfteten Behälter installiert. Zusätzlich werden Lufttemperaturdaten (Tagesmaxima) der den Messpositionen nächstgelegenen Wetterstationen (Agrometeo oder MeteoSchweiz) abgerufen.

In Chiasso wird zusätzlich ein Stück Schiene EN 60 E2 R260 im Schotter neben dem Gleis mit fünf im Profil eingelassenen Temperatursonden installiert.

Die Temperaturen werden alle 10 Minuten aufgezeichnet und mindestens alle 24 Stunden via mobile Datenverbindung auf einen Server hochgeladen. Der Auftraggeber hat jederzeit Zugriff auf den Server.

Die aufgezeichneten Daten und Auswertungen werden dem Auftraggeber in Form von Excel-Tabellen digital zur Verfügung gestellt.

Nach Abschluss der Messkampagne ist ein Messbericht mit der detaillierten Beschreibung der Messinstallation zu erstellen.

3. Versuchsaufbau

An jedem Messstandort wurden vier Temperatursonden installiert: eine an der Unterseite des Schienenfusses, eine in einer Bohrung auf Höhe der neutralen Achse im Schienensteg sowie zwei im Schotterbett. Der Lufttemperatursensor wurde in einem weissen, belüfteten Gehäuse in einer Höhe von zwei Metern unmittelbar neben dem Gleis montiert. Die folgenden Orte wurden als Messstandorte definiert.

3.1. Thurbrücke

Gleis 516, km 17.198, GPS 47.599830, 8.721894

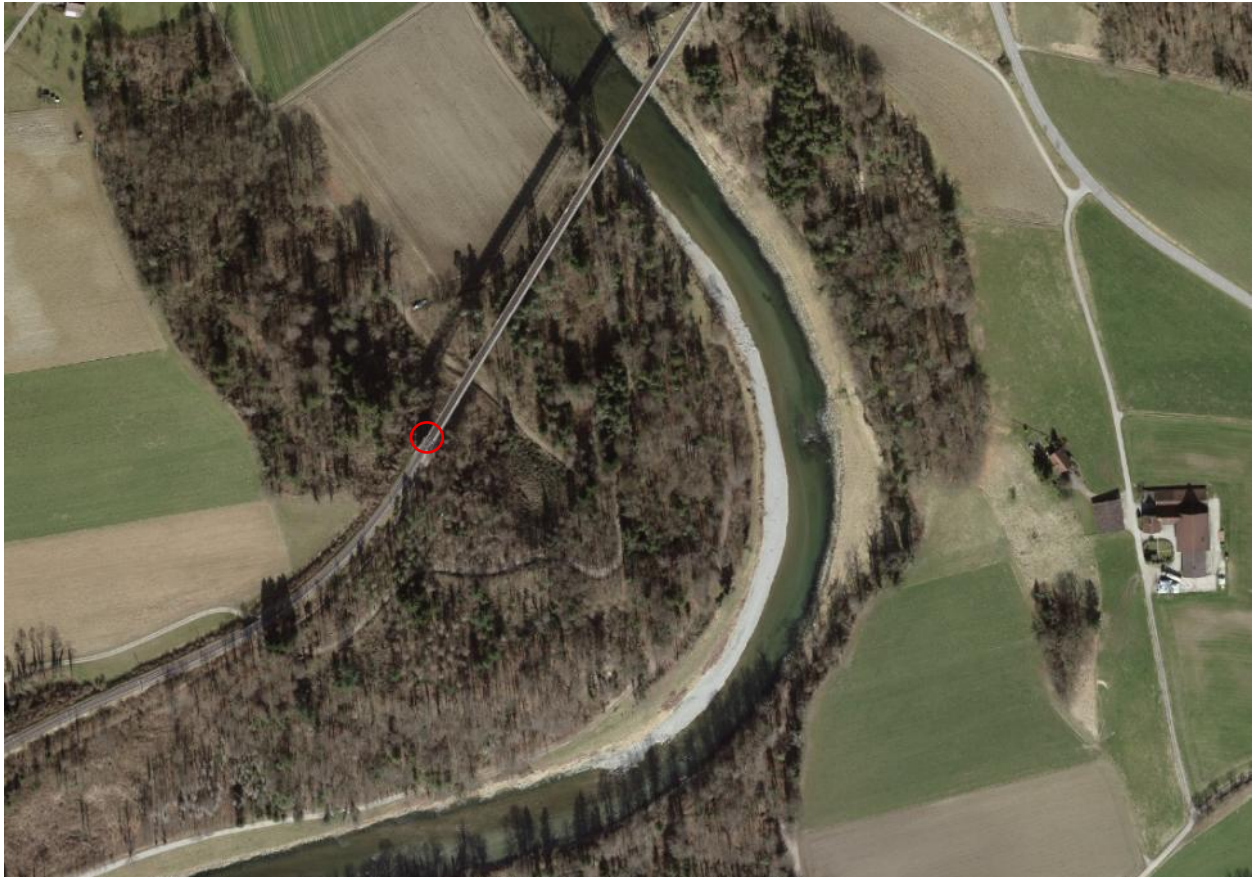
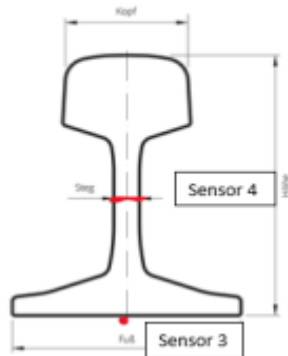


Abbildung 2 Messstandort Thurbrücke

ADU1-Thurbrücke



Metallträger Ost (Westseite): Sensor 1

Metallträger West (Ostseite): Sensor 2

Lufttemperatur: Sensor 5

Abbildung 3 Sensorpositionen Thurbrücke



Abbildung 4 Gleissensoren Thurbrücke



Abbildung 5 Lufttemperatursensor Thurbrücke

Die zusätzlichen Lufttemperaturdaten wurden von der Agrometeo-Wetterstation Uesslingen, 7.5 km entfernt, erfasst.

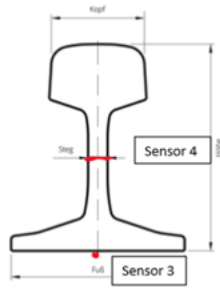
3.2. Pratteln

Gleis 109, km 10.480, GPS 47.516584, 7.714884



Abbildung 6 Messstandort Pratteln

ADU2-Pratteln, ADU3-Basel PB, ADU4-Visp, ADU6-Lugano, ADU7-Luzern



Pratteln, Visp, Luzern

- Schotter tief (40 cm): Sensor 1
- Schotter Mitte (20 cm): Sensor 2
- Lufttemperatur: Sensor 5

Basel

- Schotter tief (25 cm): Sensor 1
- Schotter Mitte (15 cm): Sensor 2
- Lufttemperatur: Sensor 5

Lugano Vedeggio

- Schotter tief (30cm): Sensor 1
- Schotter Mitte (15cm): Sensor 2
- Lufttemperatur: Sensor 5

Abbildung 7 Sensorpositionen Pratteln, Basel, Visp, Lugano, Luzern



Abbildung 8 Datenlogger Pratteln



Abbildung 9 Lufttemperatursensor Pratteln

Die zusätzlichen Lufttemperaturdaten wurden von der Agrometeo-Wetterstation Olsberg, 5.1 km entfernt, erfasst.

3.3. Basel PB

Weiche 333, km 0.500, GPS 47.544694, 7.596595



Abbildung 10 Messstandort Basel PB

Die Sensorpositionen im Gleis entsprechen Abbildung 7.



Abbildung 11 Schienensensoren Basel PB

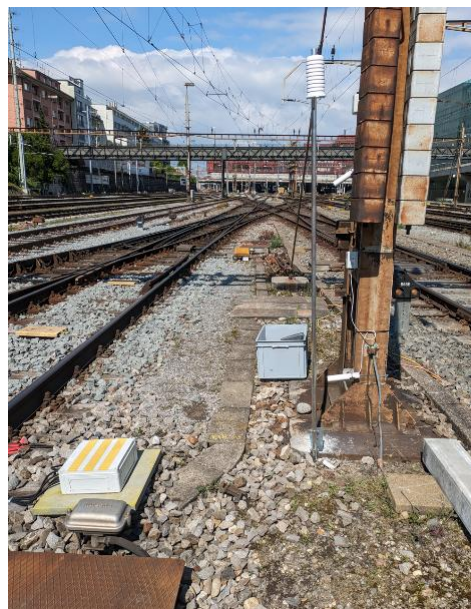


Abbildung 12 Lufttemperatursensor Basel PB

Die zusätzlichen Lufttemperaturdaten wurden von der MeteoSchweiz-Wetterstation Basel-Binningen, 1.1 km entfernt, erfasst.

3.4. Visp

Gleis 114, km 133.655, GPS 46.305501, 7.847830



Abbildung 13 Messstandort Visp

Die Sensorpositionen im Gleis entsprechen Abbildung 7.



Abbildung 14 Schienensensoren Visp



Abbildung 15 Lufttemperatursensor Visp

Die zusätzlichen Lufttemperaturdaten wurden von der 0.5 km entfernten MeteoSchweiz-Wetterstation Visp erfasst.

3.5. Chiasso

Gleis 563, km 205.800, GPS 45.833647, 9.027199

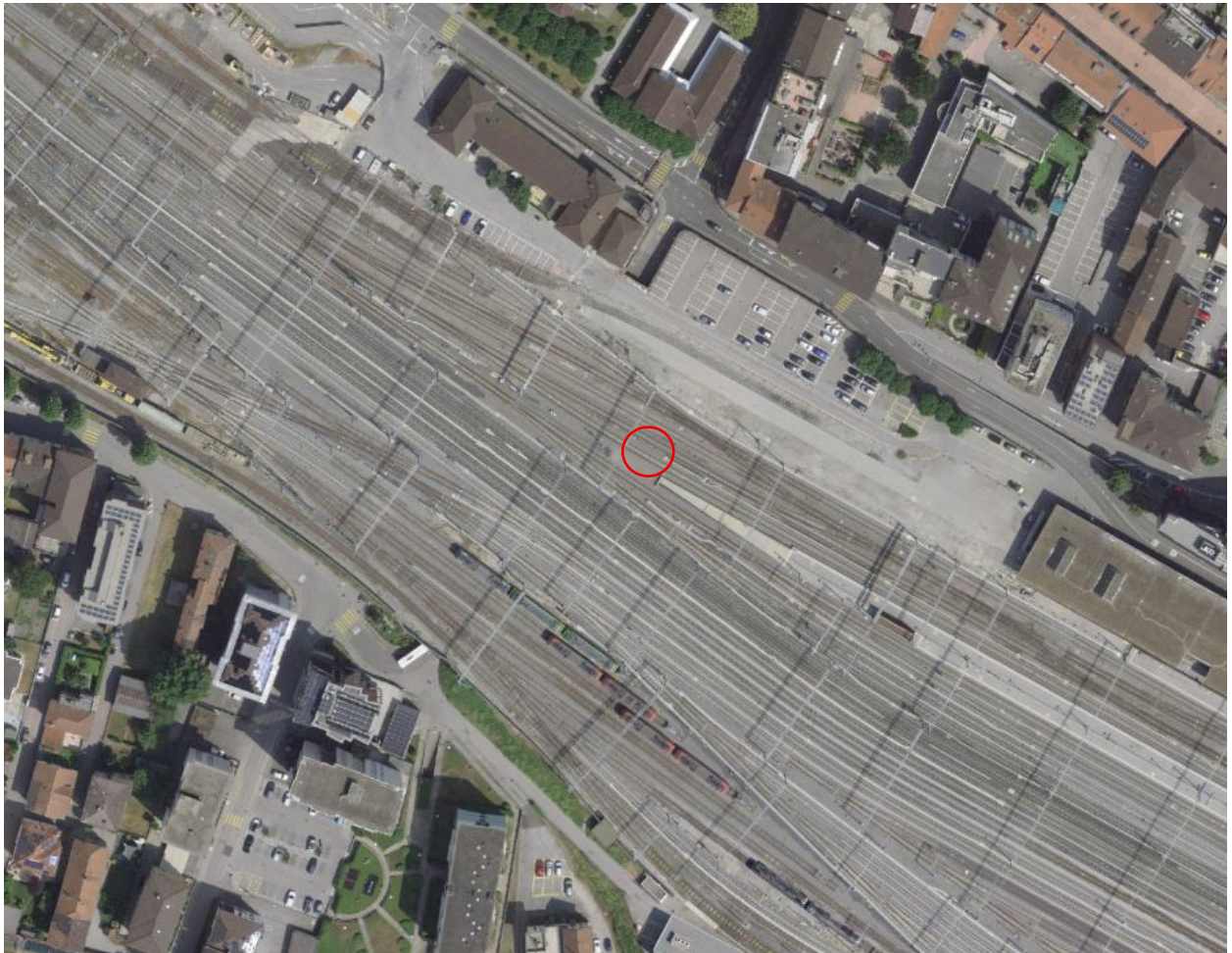
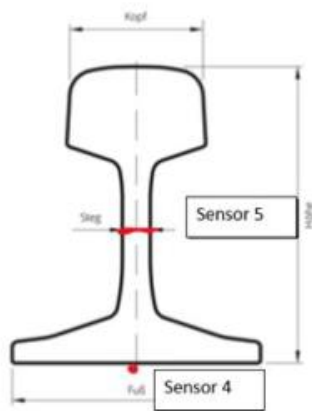


Abbildung 16 Messstandort Chiasso

ADU5-Chiasso



Lufttemperatursenor: Sensor 1
 Schotter tief (40 cm): Sensor 2
 Schotter mitte (20 cm): Sensor 3

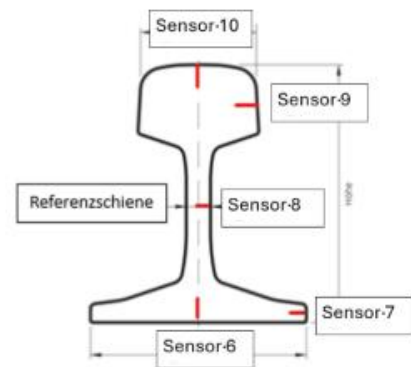


Abbildung 17 Sensorpositionen Chiasso



Abbildung 18 Schienensensoren Chiasso (mit Referenzschiene rechts)

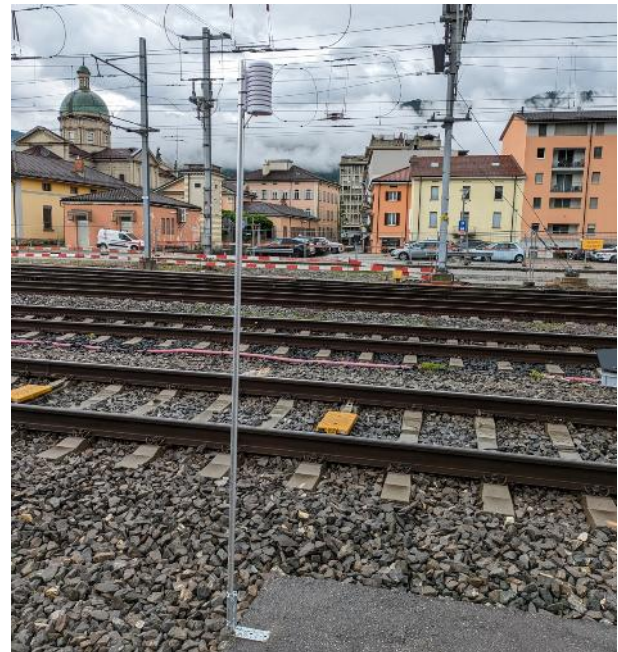


Abbildung 19 Lufttemperatursensor Chiasso

Die zusätzlichen Lufttemperaturdaten wurden von der Agrometeo-Wetterstation Mezzana, 3.1 km entfernt, erfasst.

3.6. Lugano

Gleis 508, km 7.880, GPS 46.043491, 8.925236



Abbildung 20 Messstandort Lugano

Die Sensorpositionen im Gleis entsprechen Abbildung 7.



Abbildung 21 Schienensensoren Lugano



Abbildung 22 Lufttemperatursensor Lugano

Die zusätzlichen Lufttemperaturdaten wurden von der Agrometeo-Wetterstation Cademario, 3.4 km entfernt, erfasst.

3.7. Luzern

Gleis 375, km 175.700, GPS 47.040882, 8.352811



Abbildung 23 Messstandort Luzern

Die Sensorpositionen im Gleis entsprechen Abbildung 7.



Abbildung 24 Schienensensoren Luzern



Abbildung 25 Lufttemperatursensor Luzern

Die zusätzlichen Lufttemperaturdaten wurden von der MeteoSchweiz-Wetterstation Luzern, 3.9 km entfernt, erfasst.

3.8. Messgeräte und Messunsicherheit

3.8.1. Temperatursensoren

Es wurden Keynes Controls RTD PT100 Klasse B Temperatursensoren mit einer Messgenauigkeit von: $\Delta T = \pm (0.30 + 0.005 \times |t|)$ (gemäss IEC 60751)

3.8.2. Datalogger

Die Messungen wurden mit Infinite ADU-500 Dataloggern aufgezeichnet und in einer Infinite WaT (Web aided Telemetry) Cloud gespeichert.

4. Messprogramm

Die ursprünglich vorgesehenen fünf Messstationen Thurbrücke, Pratteln, Basel PB, Visp und Chiasso wurden im Juli 2023 in Betrieb genommen. Im Mai 2024 kamen die zusätzlichen Standorte Lugano und Luzern hinzu. Das Ende der Messung fand am 15. September 2025 statt. Aufgrund eines Systemausfalls Mitte Juli 2025 wurden die Messungen an der Thurbrücke nicht weitergeführt.

Messstandort	Messbeginn	Messende
Thurbrücke	05.07.2023	15.07.2025
Pratteln	05.07.2023	15.09.2025
Basel PB	05.07.2023	15.09.2025
Visp	14.07.2023	15.09.2025
Chiasso	18.07.2023	15.09.2025
Lugano	24.05.2024	27.08.2025
Luzern	07.05.2024	27.08.2025

Tabelle 1 Messzeitraum

5. Resultate

5.1. Auswertung

Für die folgenden Auswertungen wird – sofern nicht anders vermerkt – die Lufttemperatur des Wetterdienstes verwendet.

In den Regressionsdiagrammen, bei denen die Lufttemperatur direkt am Messstandort berücksichtigt wurde, wurde dieser Wert um 2.4 °C reduziert. Dieser Korrekturwert entspricht dem durchschnittlichen Unterschied zwischen den maximalen Temperaturen der Wetterstationen und jenen an den Messstandorten (mit Ausnahme von Chiasso und Lugano). Im Mittel sind die Temperaturen an den Messstandorten also rund 2.4 °C höher als an den benachbarten Wetterstationen.

Im Hinblick auf die zentrale Fragestellung der Messkampagne werden in den Auswertungen der einzelnen Messpunkte – sofern nicht anders vermerkt – ausschliesslich die jeweiligen Tagesmaxima berücksichtigt.

Der Bestimmung der Regressionsgeraden zwischen Luft- und Schienentemperaturen geht jeweils eine Filterung der Messtage voraus. Relevant sind dabei Tage mit direkter Sonneneinstrahlung auf die Schiene, an denen eine deutliche Erwärmung des Schienenmaterials und somit eine grössere Differenz zwischen Luft- und Schienentemperatur auftritt.

In der folgenden Auswertung wurden daher jene Tagesmaxima berücksichtigt, bei denen die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Schienenfuss (ΔT) mehr als 15 °C beträgt.

5.2. Messstandorte

5.2.1. Thurbrücke

Die Schienenfussstemperatur erreichte am 02.07.2025 einen Maximalwert von 52.3 °C. Zum Zeitpunkt dieser Messung lag die Lufttemperatur bei 34.6 °C. Die niedrigste Schienenfussstemperatur wurde am 20.01.2024 mit einem Wert von -10.6 °C festgestellt.

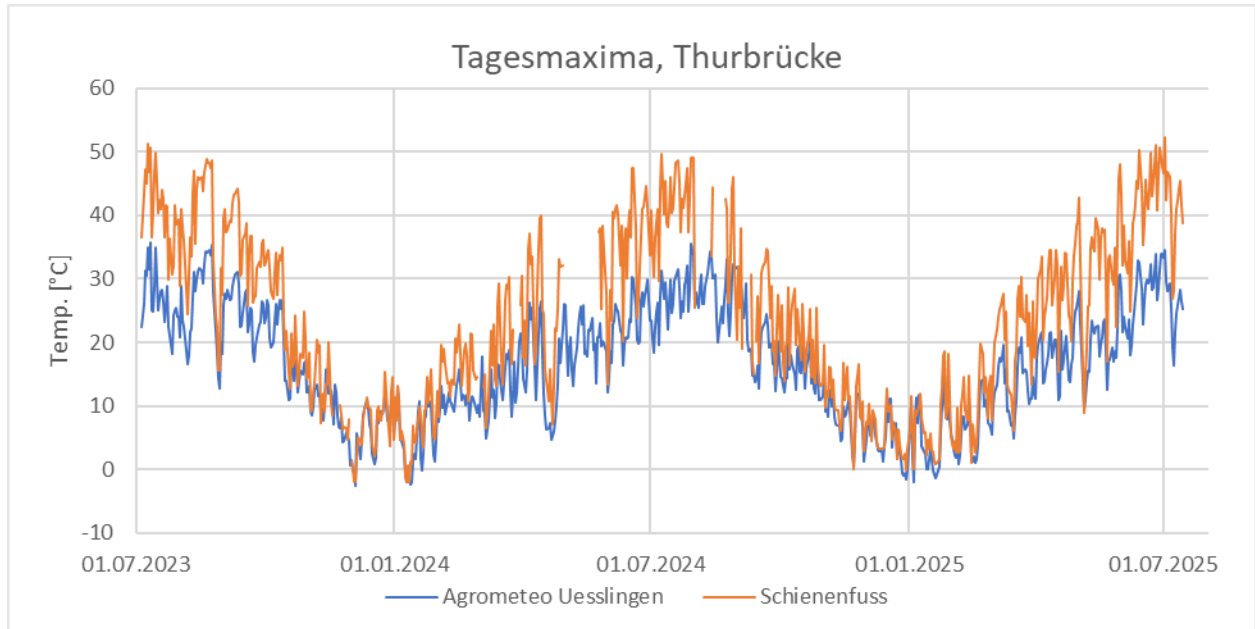


Abbildung 26 Tagesmaxima Thurbrücke

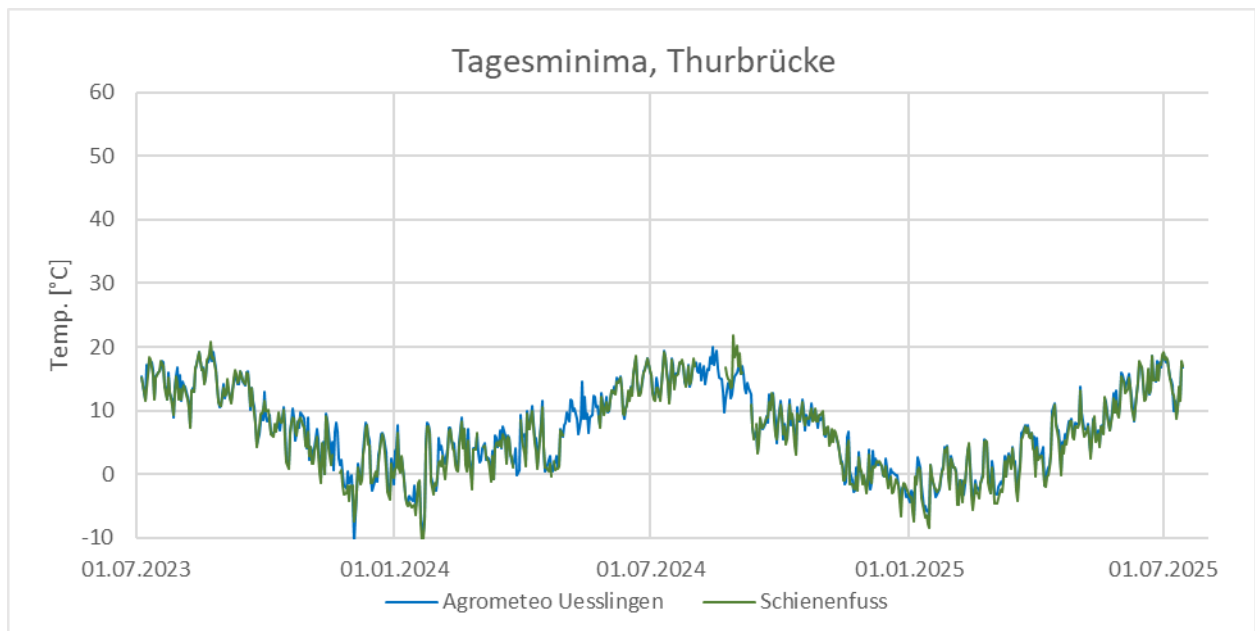


Abbildung 27 Tagesminima Thurbrücke

Die Messdaten zeigen an Schönwettertagen einen linearen Zusammenhang zwischen den Temperaturen von Schiene, Schotter und Luft. Die nachfolgenden Diagramme stellen diesen Zusammenhang für unterschiedliche Messstandorte der Lufttemperaturen dar.

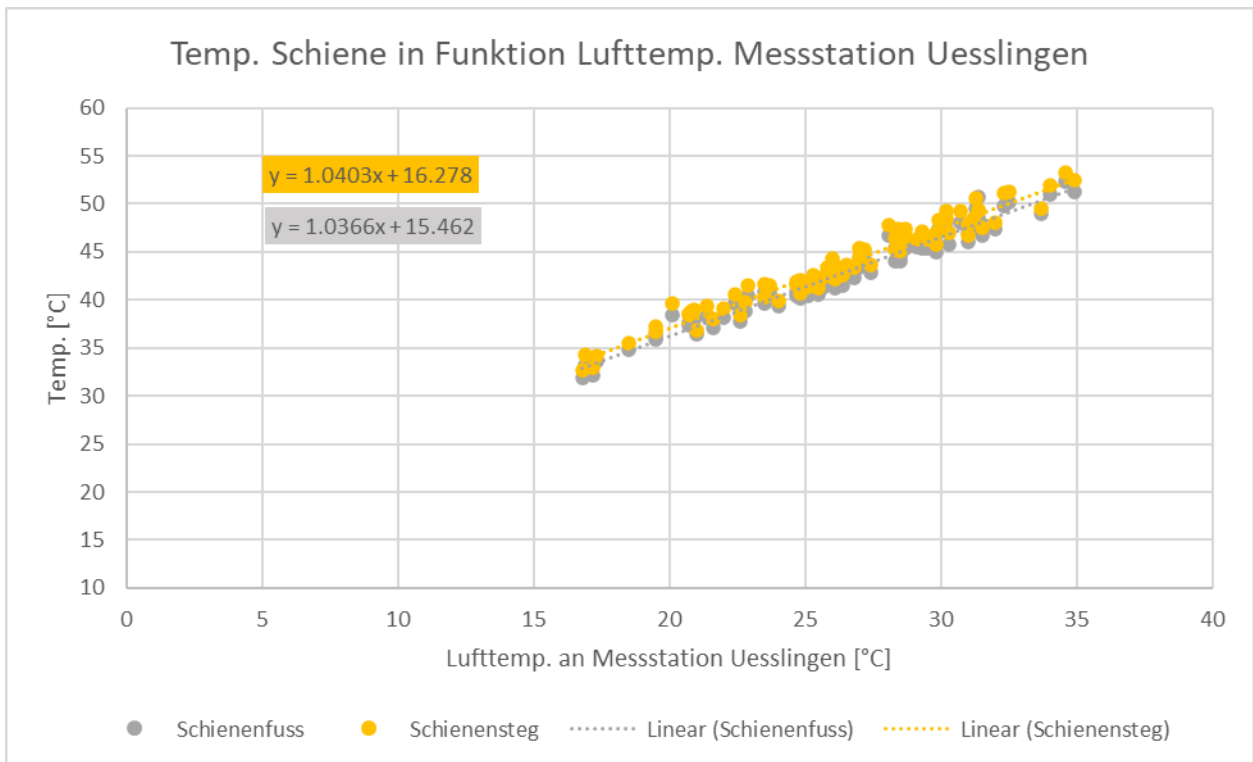


Abbildung 28 Regression Schiene Thurbrücke (Uesslingen)

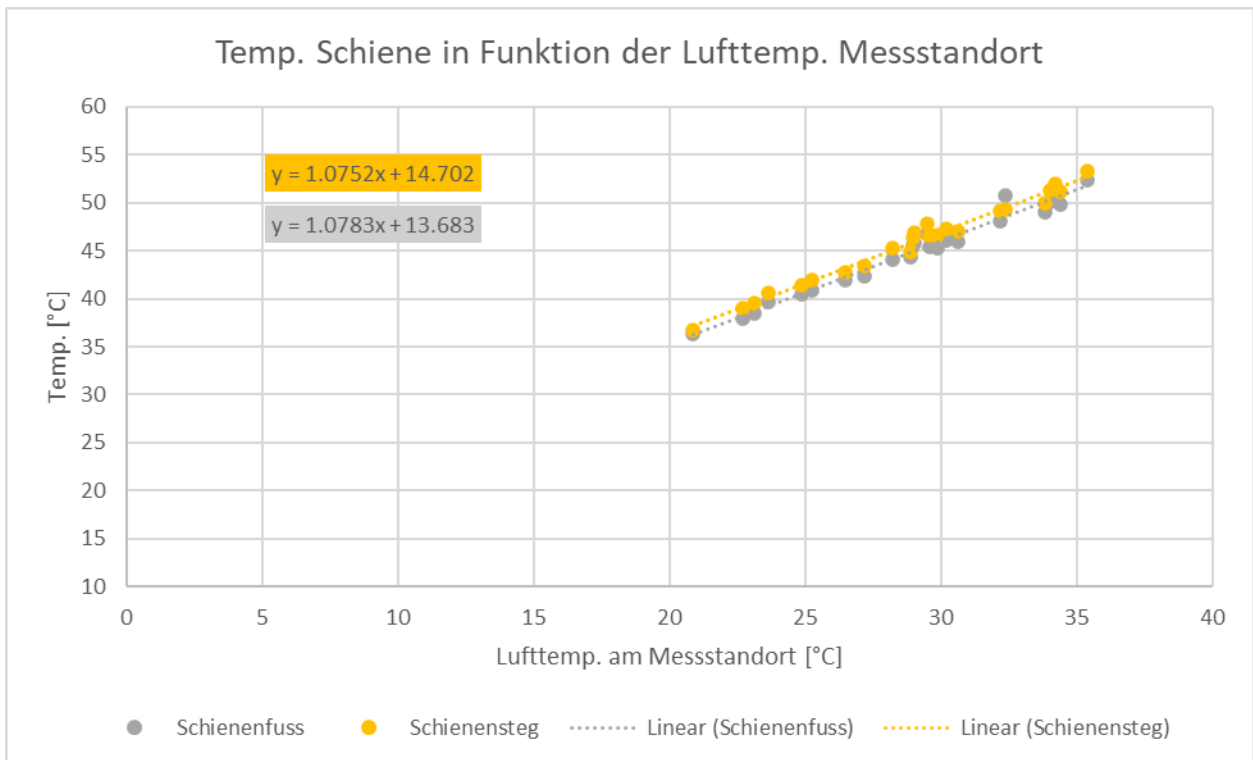


Abbildung 29 Regression Schiene Thurbrücke (Messstandort)

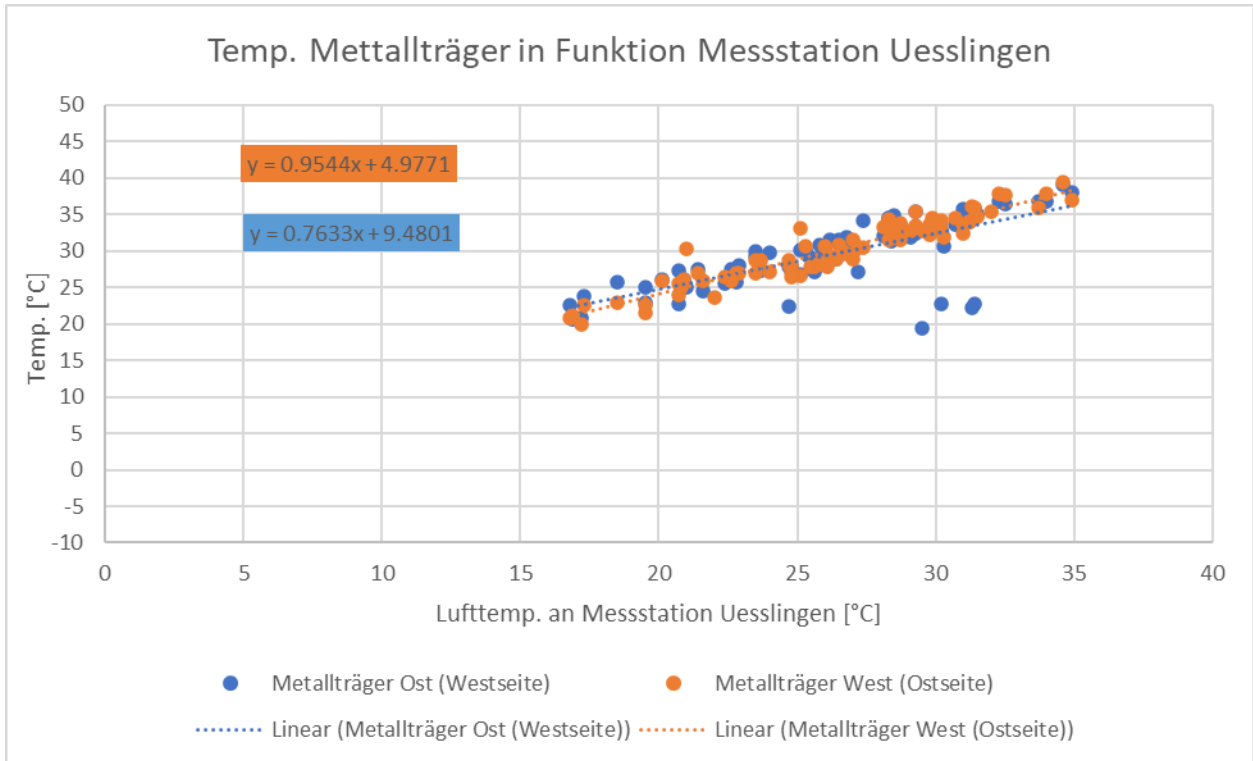


Abbildung 30 Regression Metallträger Thurbrücke (Uesslingen)

5.2.2. Pratteln

Die Schienenfussstemperatur erreichte am 02.07.2025 einen Maximalwert von 56.7 °C. Zum Zeitpunkt dieser Messung lag die Lufttemperatur bei 35.8 °C. Die niedrigste Schienenfussstemperatur wurde am 04.01.2025 mit einem Wert von -9.1 °C festgestellt.

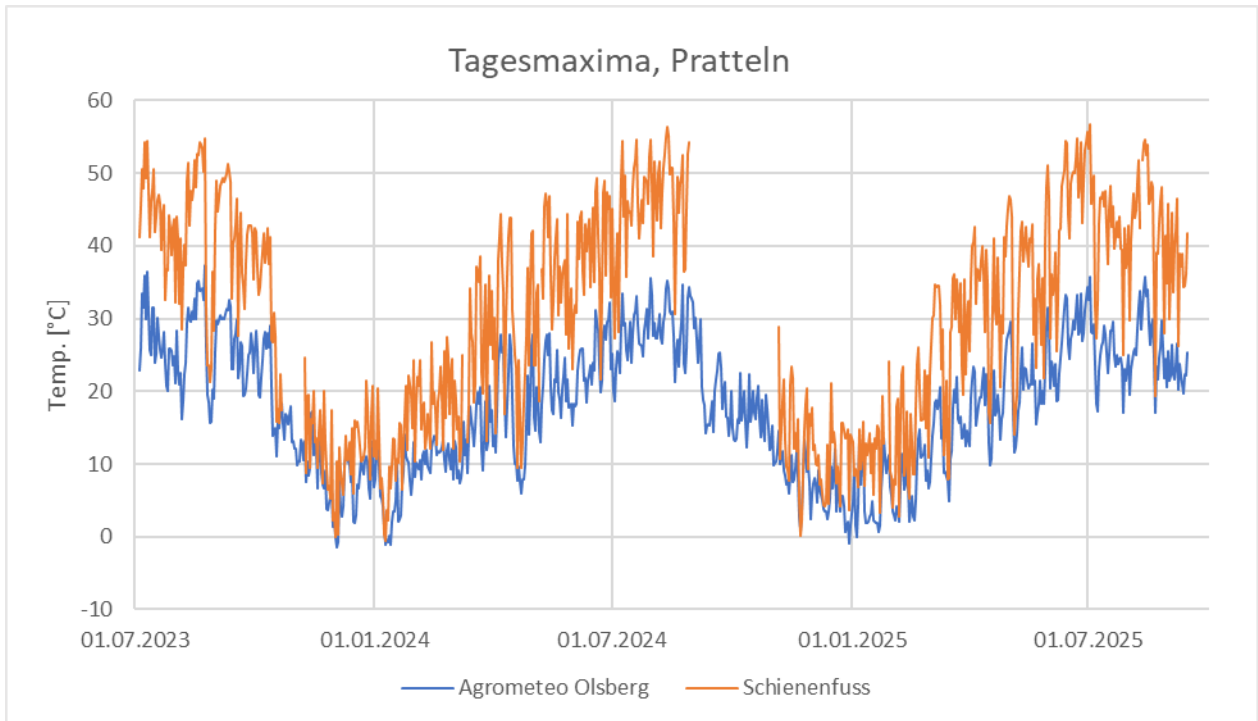


Abbildung 31 Tagesmaxima Pratteln

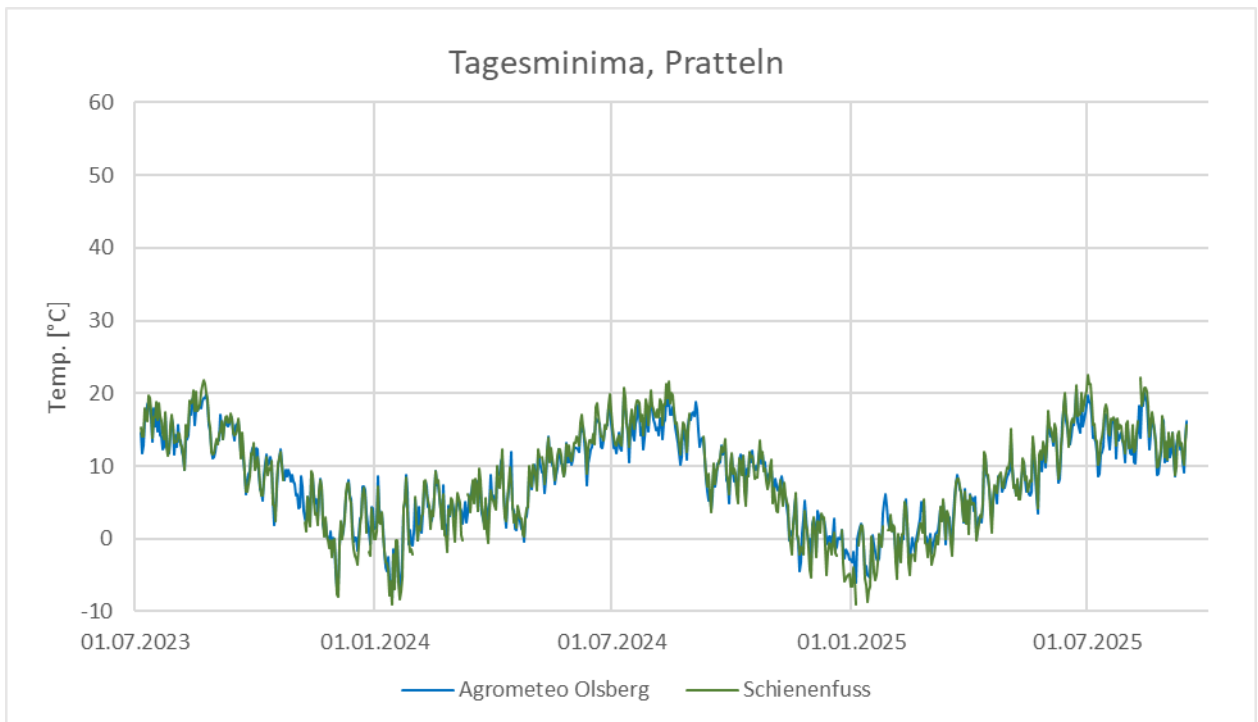


Abbildung 32 Tagesminima Pratteln

Die Messdaten zeigen an Schönwettertagen einen linearen Zusammenhang zwischen den Temperaturen von Schiene, Schotter und Luft. Die nachfolgenden Diagramme stellen diesen Zusammenhang für unterschiedliche Messstandorte der Lufttemperaturen dar.

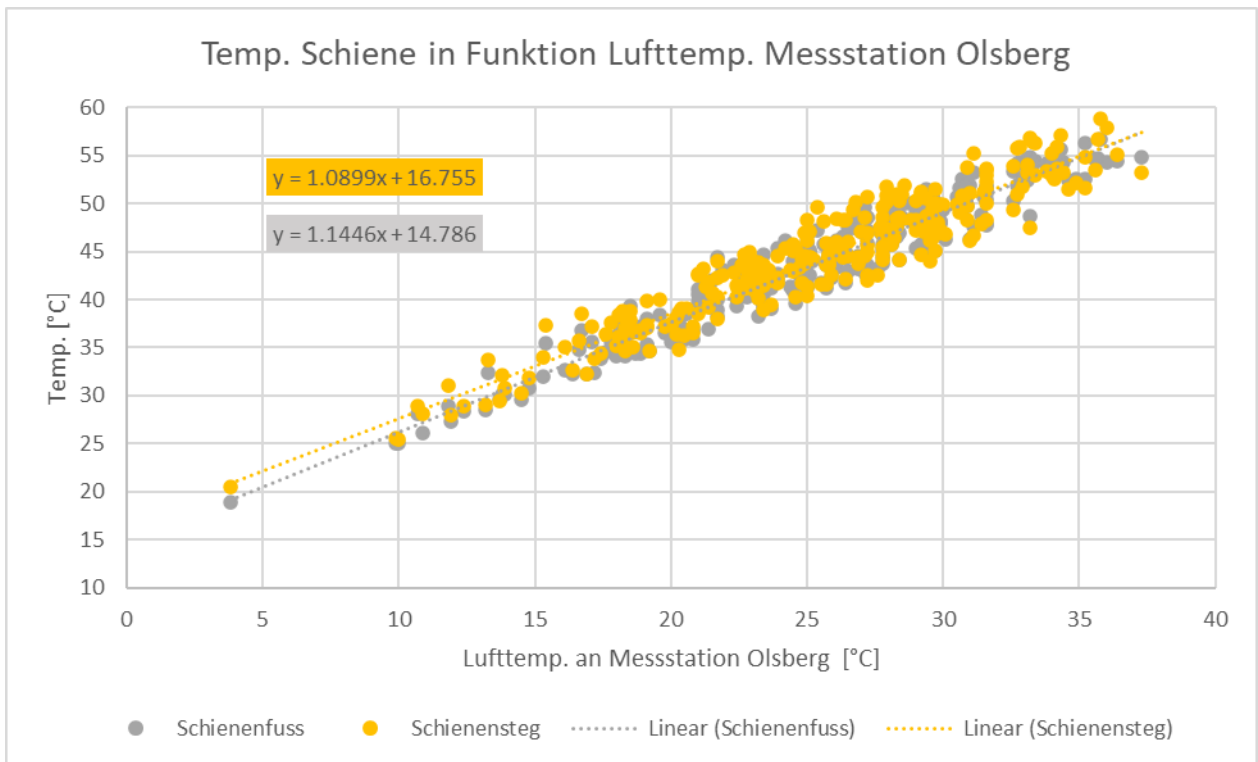


Abbildung 33 Regression Schiene Pratteln (Olsberg)

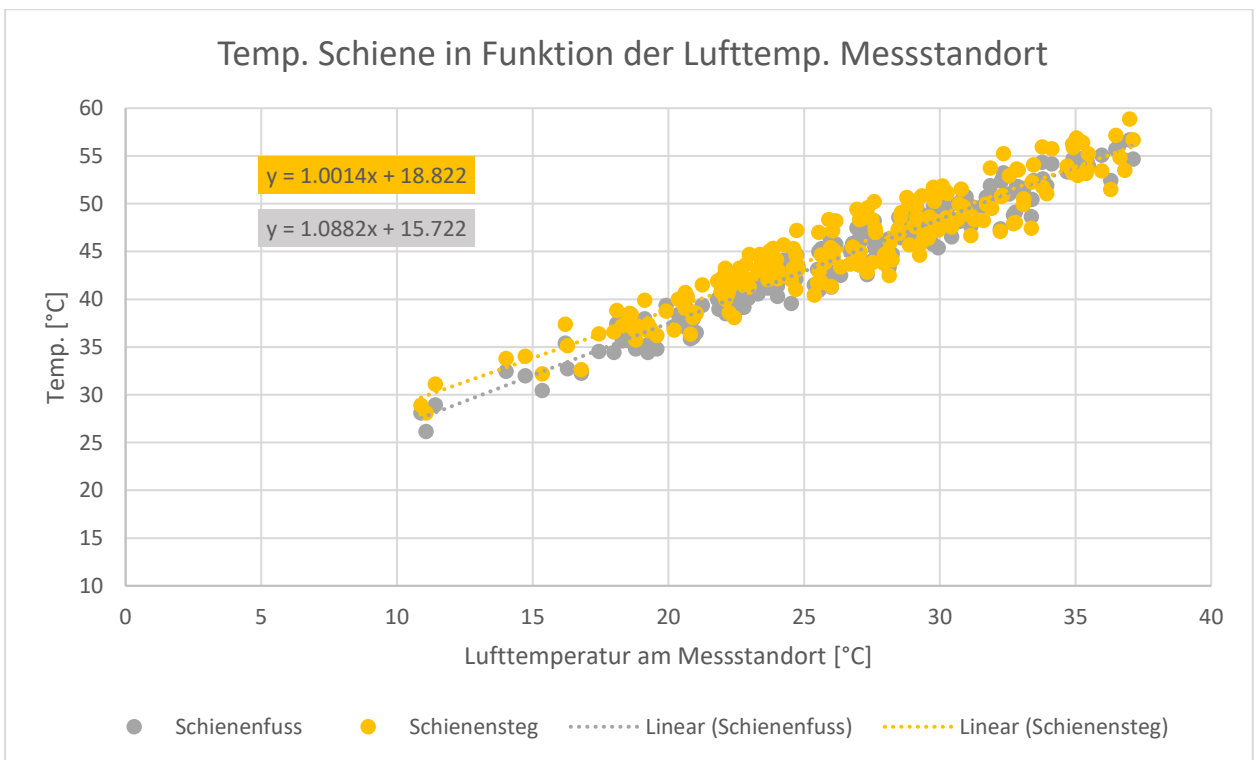


Abbildung 34 Regression Schiene Pratteln (Messstandort)

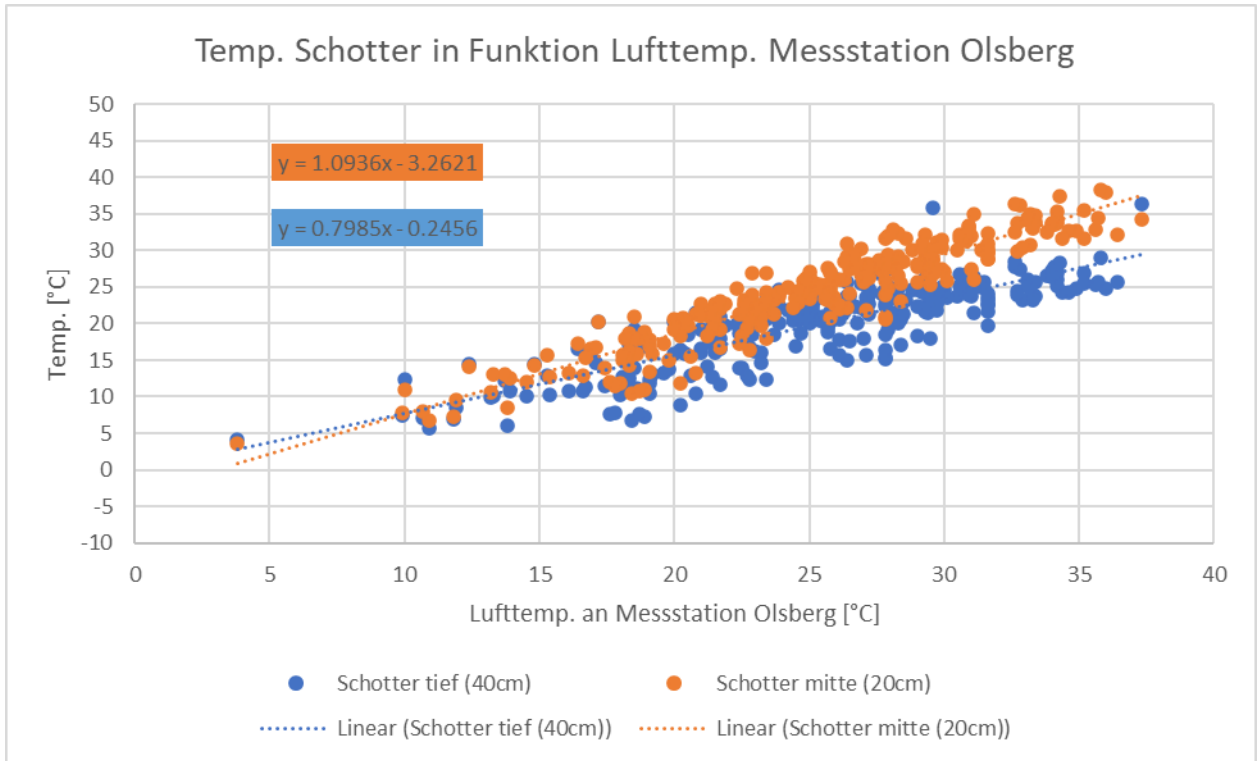


Abbildung 35 Regression Schotter Pratteln (Olsberg)

5.2.3. Basel PB

Die Schienenfussstemperatur erreichte am 02.07.2025 einen Maximalwert von 57.2 °C. Zum Zeitpunkt dieser Messung lag die Lufttemperatur bei 35.7 °C. Die niedrigste Schienenfussstemperatur wurde am 13.01.2025 mit einem Wert von -7.1 °C festgestellt.

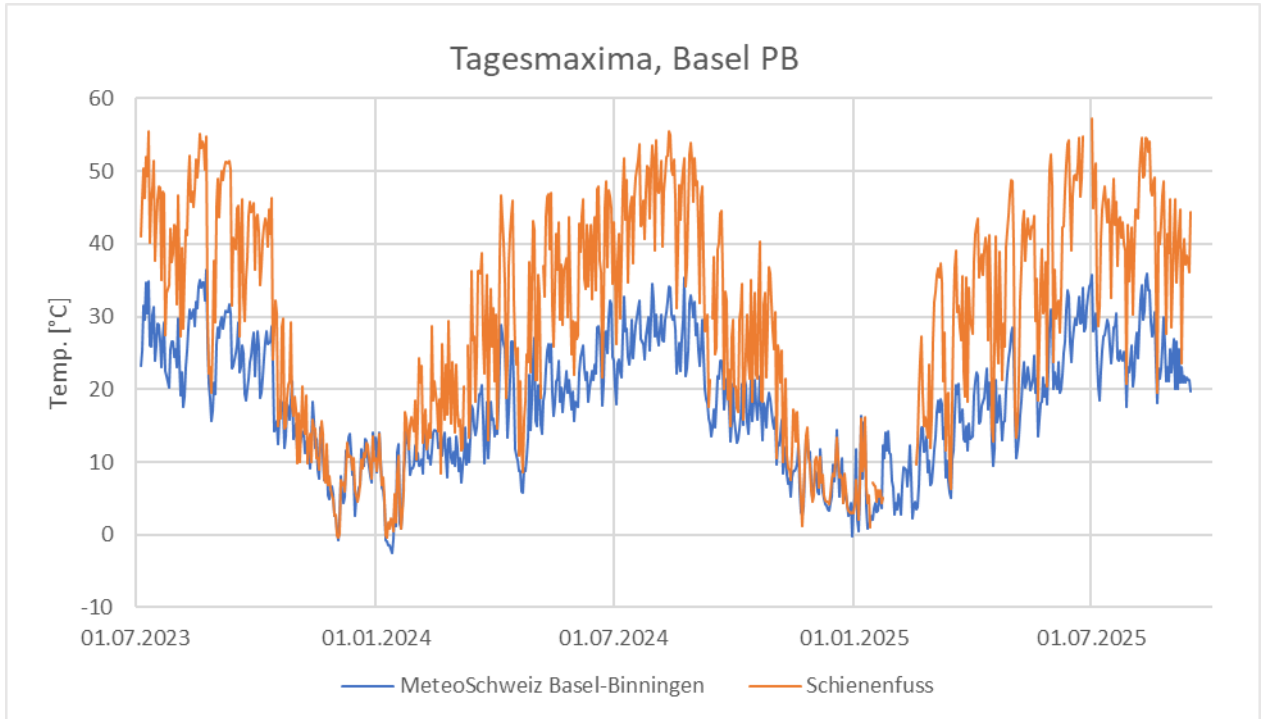


Abbildung 36 Tagesmaxima Basel PB

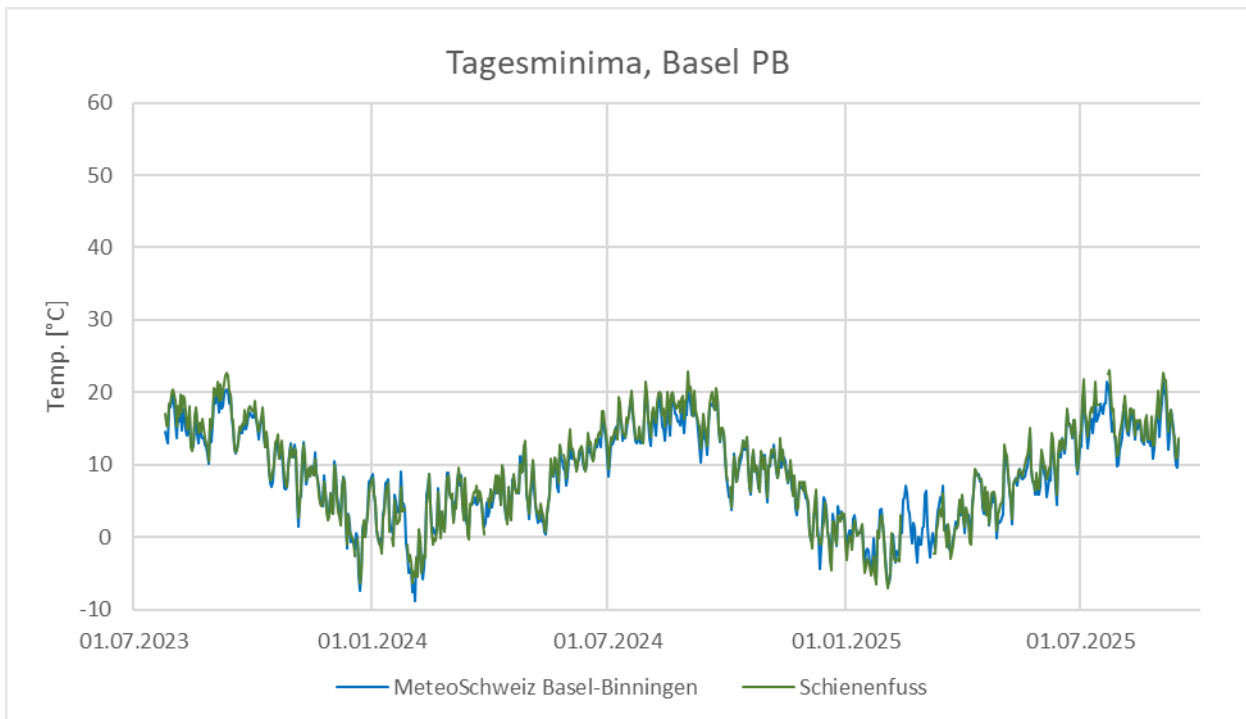


Abbildung 37 Tagesminima Basel PB

Die Messdaten zeigen an Schönwettertagen einen linearen Zusammenhang zwischen den Temperaturen von Schiene, Schotter und Luft. Die nachfolgenden Diagramme stellen diesen Zusammenhang für unterschiedliche Messstandorte der Lufttemperaturen dar.

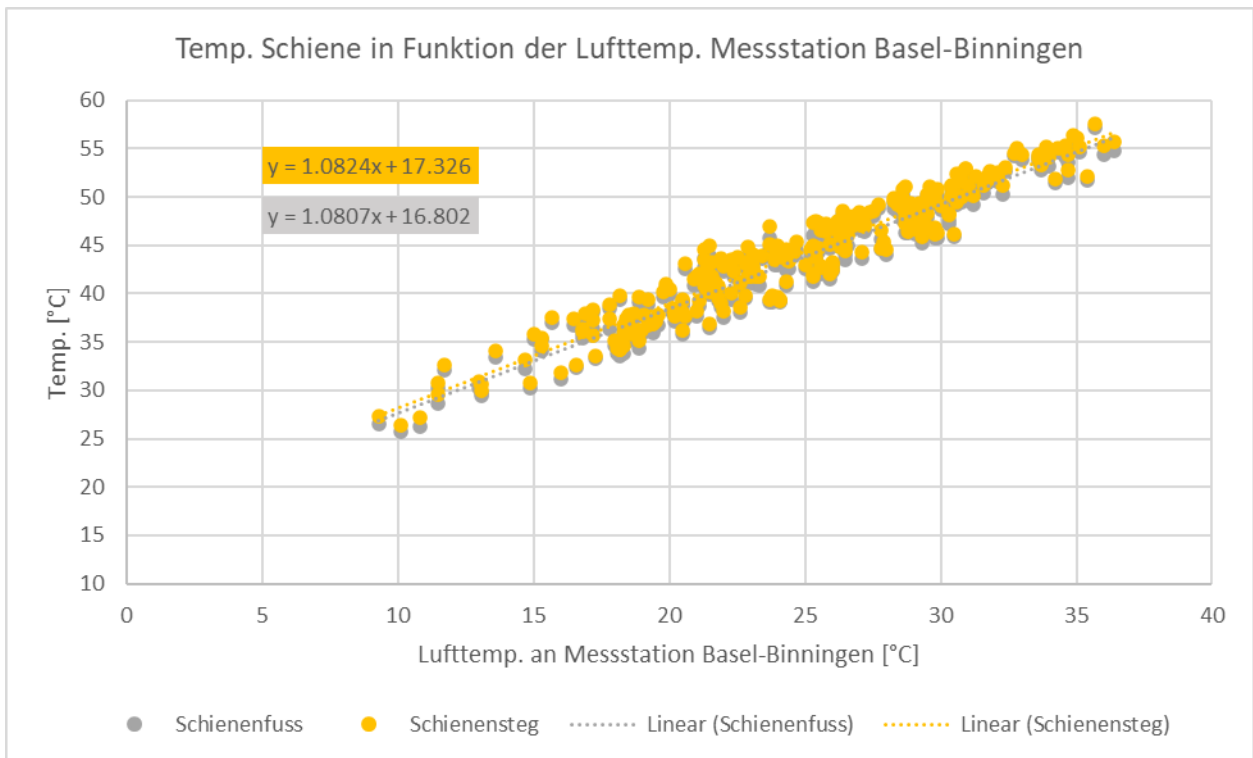


Abbildung 38 Regression Schiene Basel PB (Basel-Binningen)

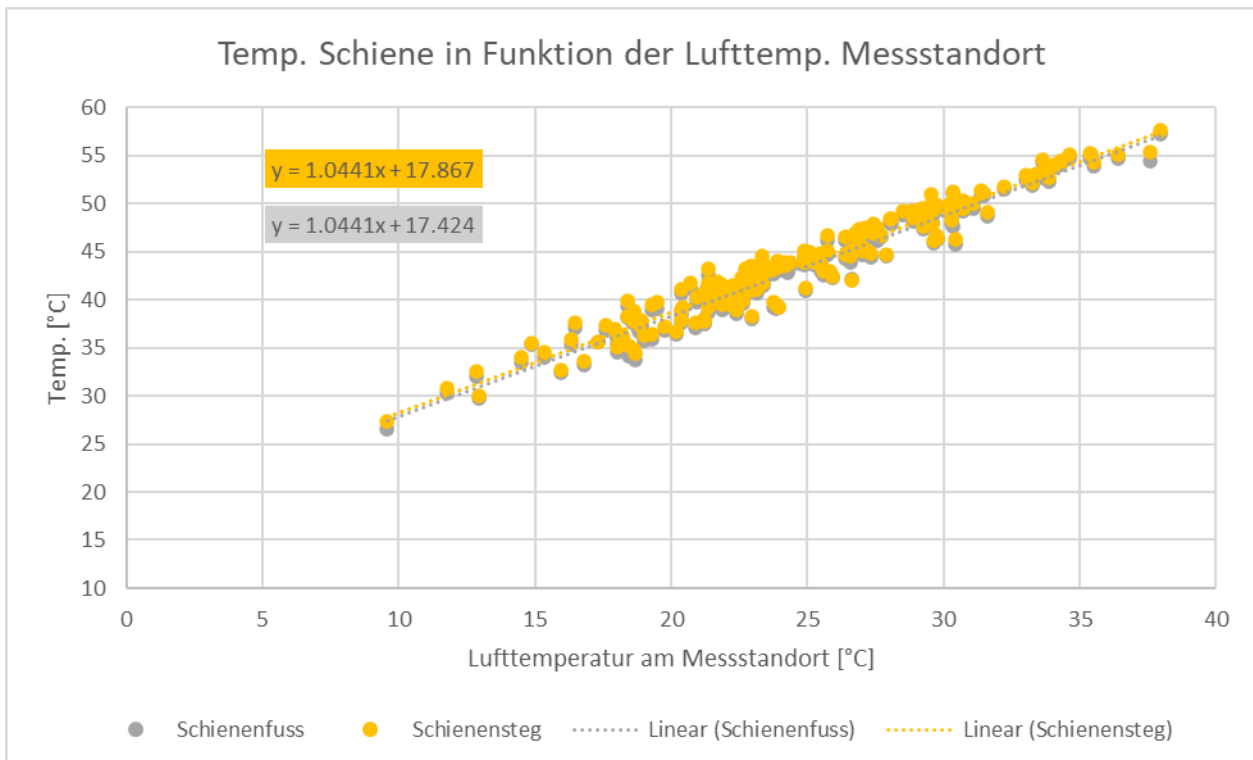


Abbildung 39 Regression Schiene Basel PB (Messstandort)

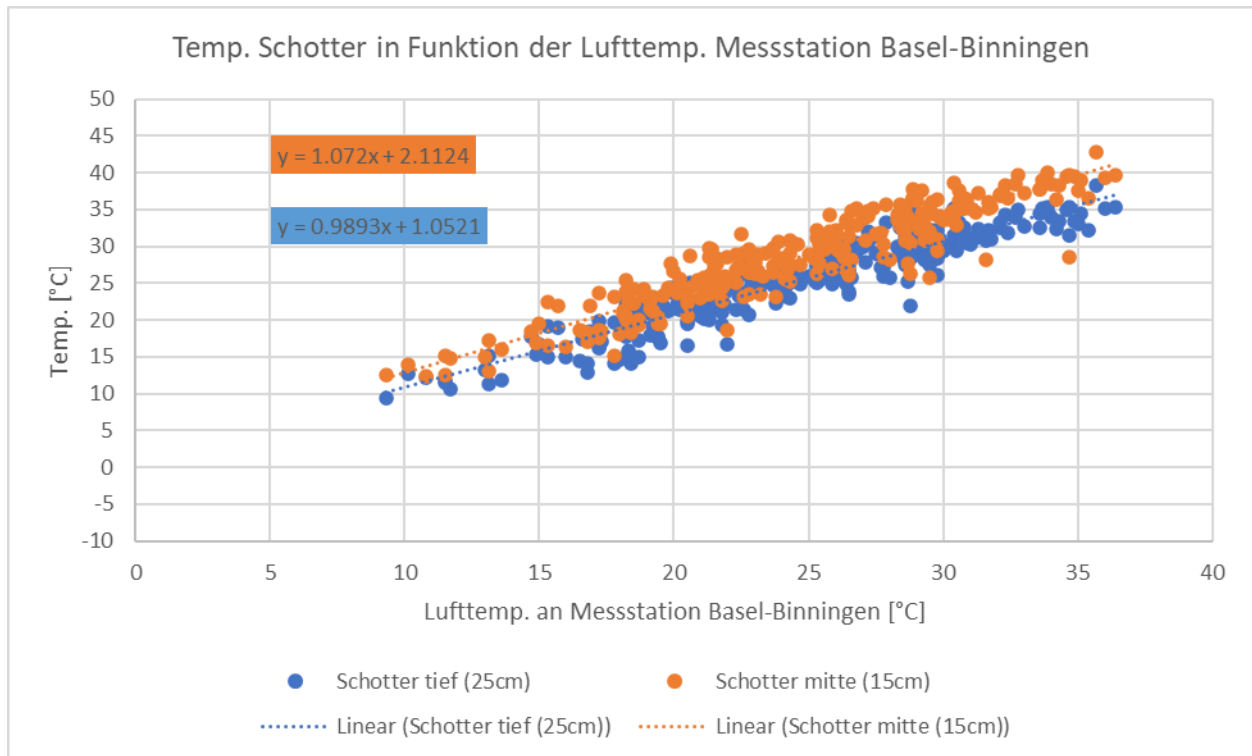


Abbildung 40 Regression Schotter Basel PB (Basel-Binningen)

5.2.4. Visp

Die Schienenfussstemperatur erreichte am 30.07.2024 einen Maximalwert von 58.2 °C. Zum Zeitpunkt dieser Messung lag die Lufttemperatur bei 33.9 °C. Die niedrigste Schienenfussstemperatur wurde am 16.01.2025 mit einem Wert von -9.5 °C festgestellt.

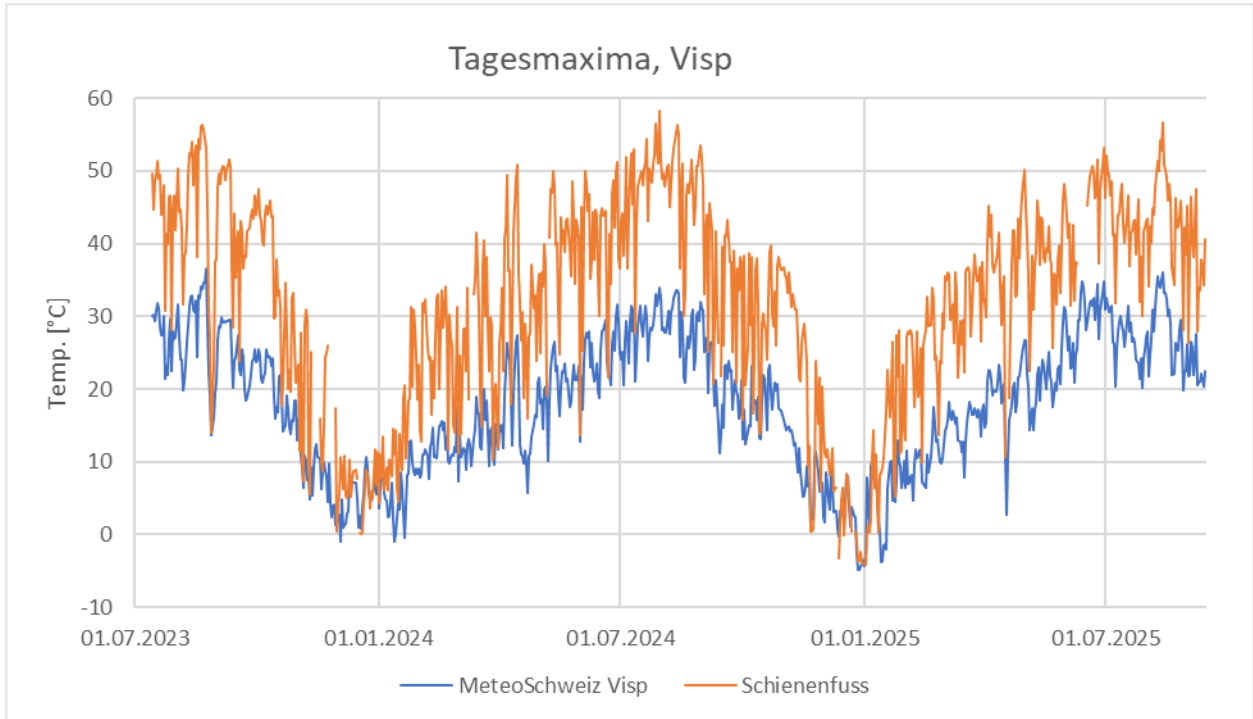


Abbildung 41 Tagesmaxima Visp

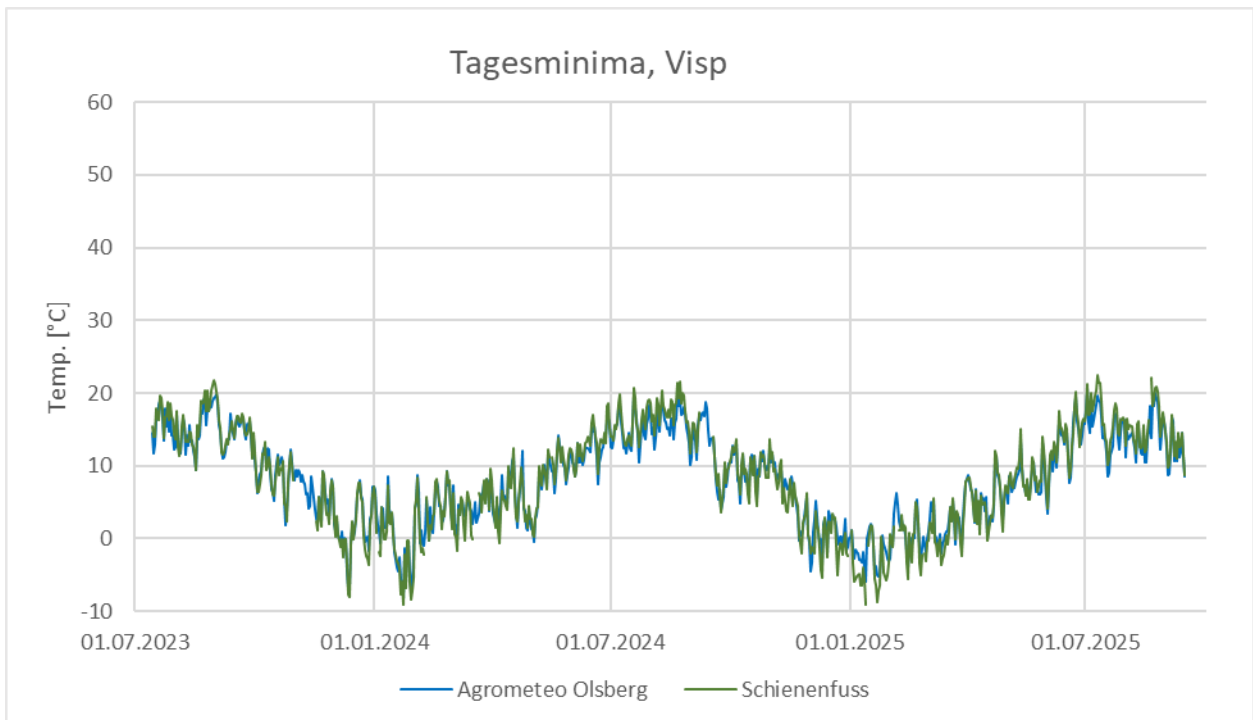


Abbildung 42 Tagesminima Visp

Die Messdaten zeigen an Schönwettertagen einen linearen Zusammenhang zwischen den Temperaturen von Schiene, Schotter und Luft. Die nachfolgenden Diagramme stellen diesen Zusammenhang für unterschiedliche Messstandorte der Lufttemperaturen dar.

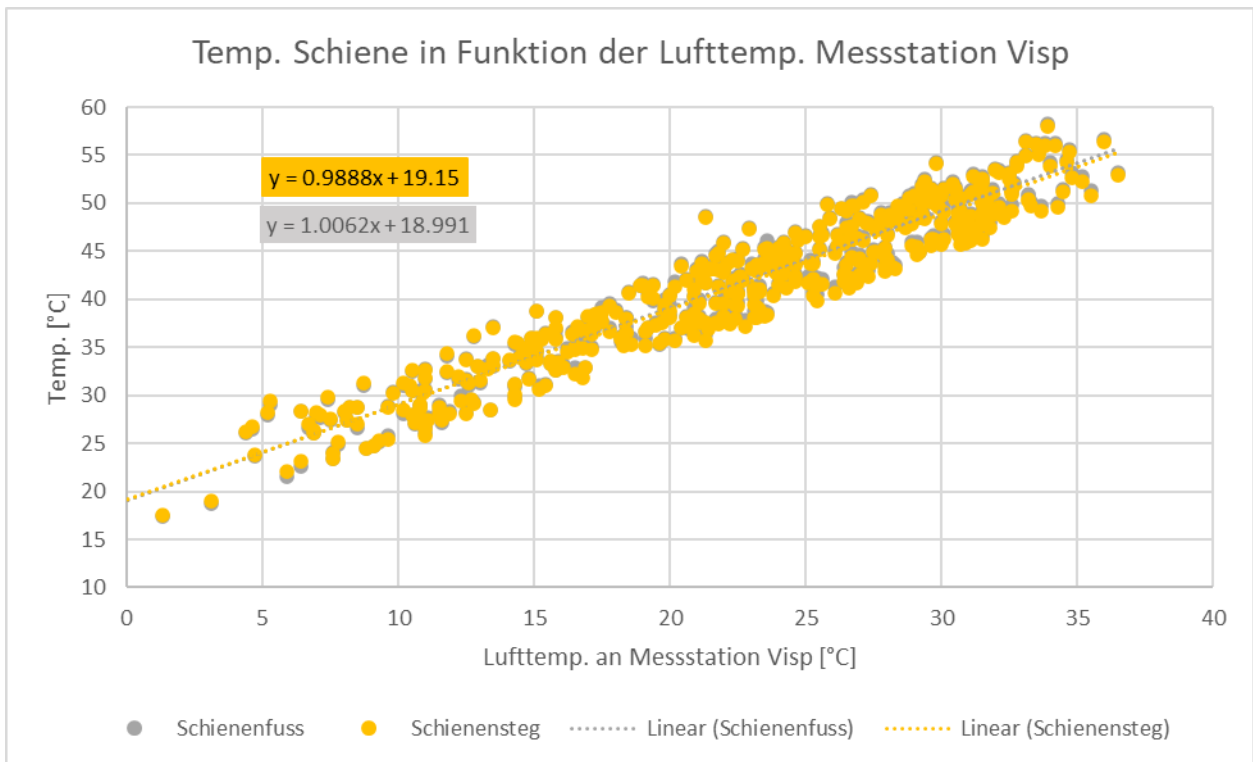


Abbildung 43 Regression Schiene Visp (Visp)

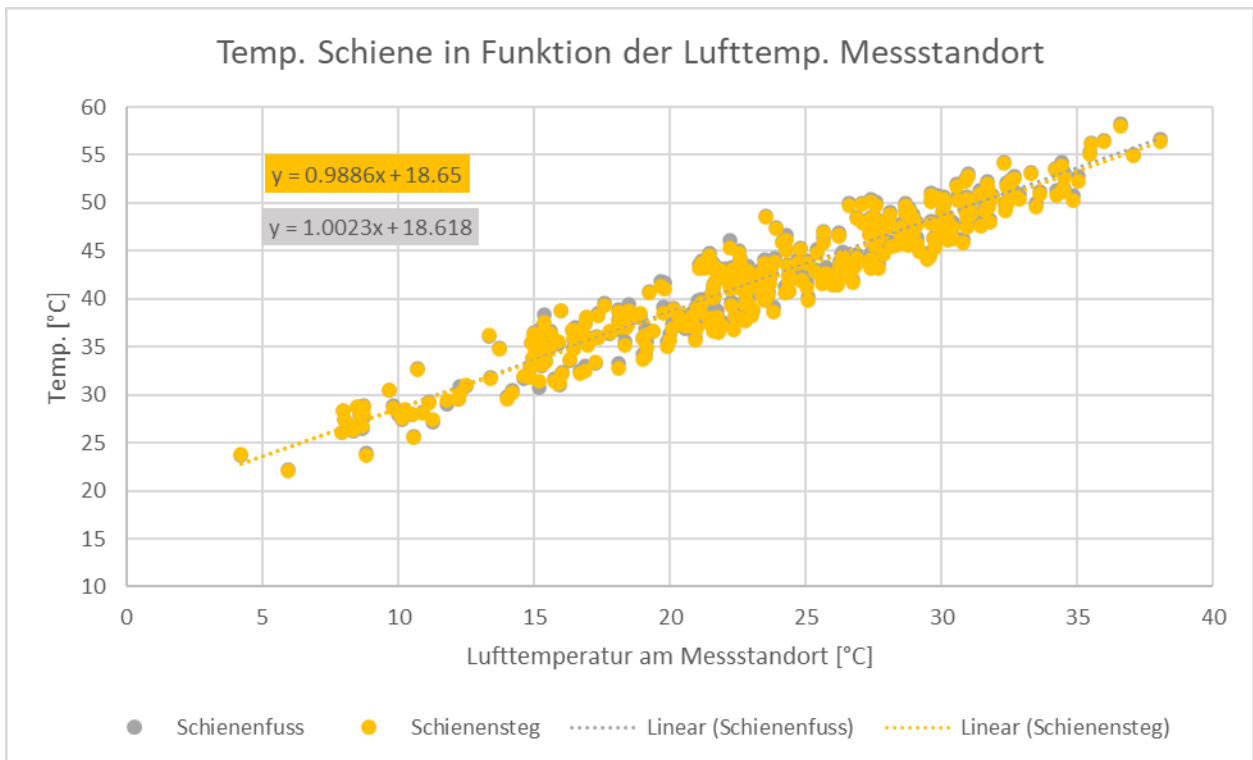


Abbildung 44 Regression Schiene Visp (Messstandort)

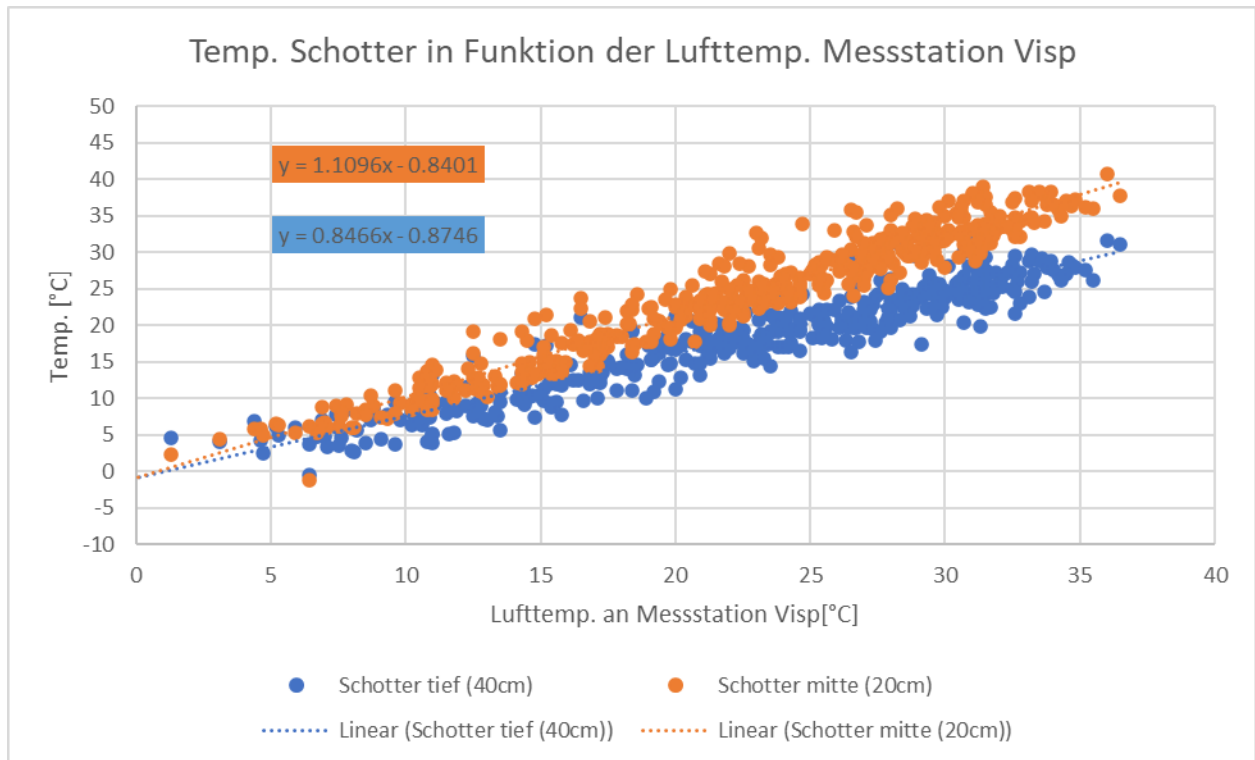


Abbildung 45 Regression Schotter Visp (Visp)

5.2.5. Chiasso

Die Schienenfustemperatur erreichte am 23.08.2023 einen Maximalwert von 57.1 °C. Zum Zeitpunkt dieser Messung lag die Lufttemperatur bei 35.5 °C. Die niedrigste Schienenfustemperatur wurde am 04.12.2023 mit einem Wert von -8.3 °C festgestellt.

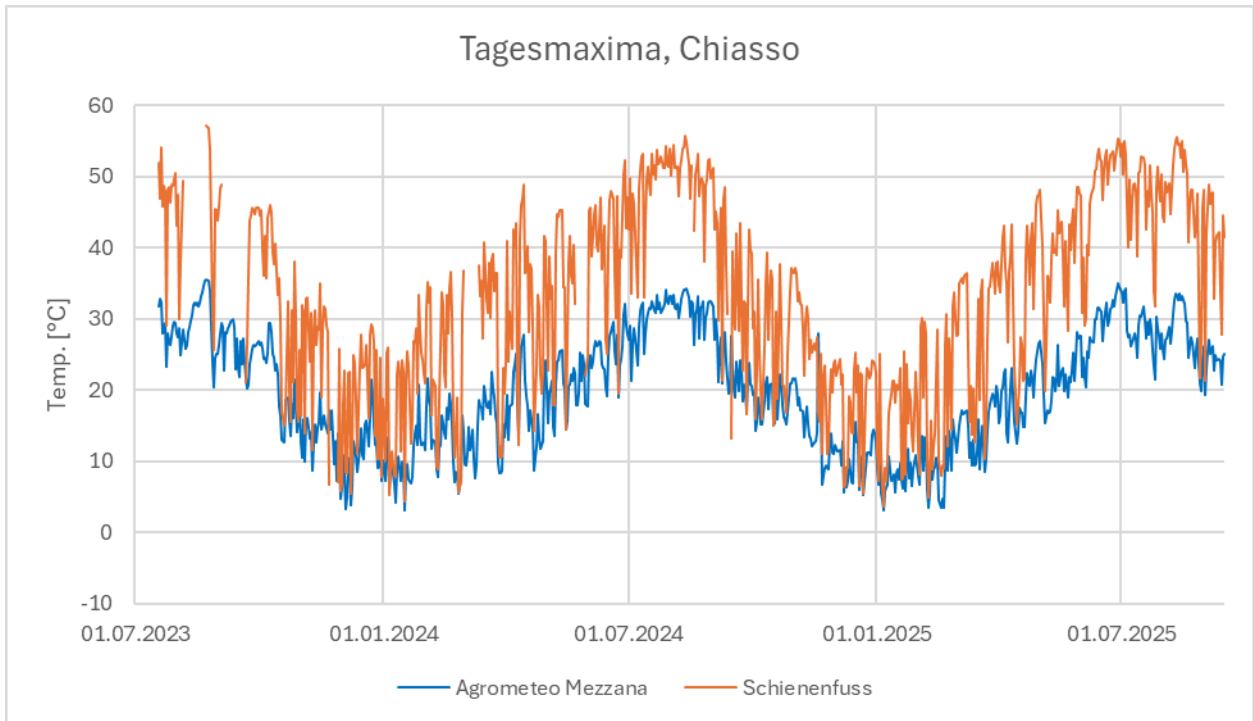


Abbildung 46 Tagesmaxima Chiasso

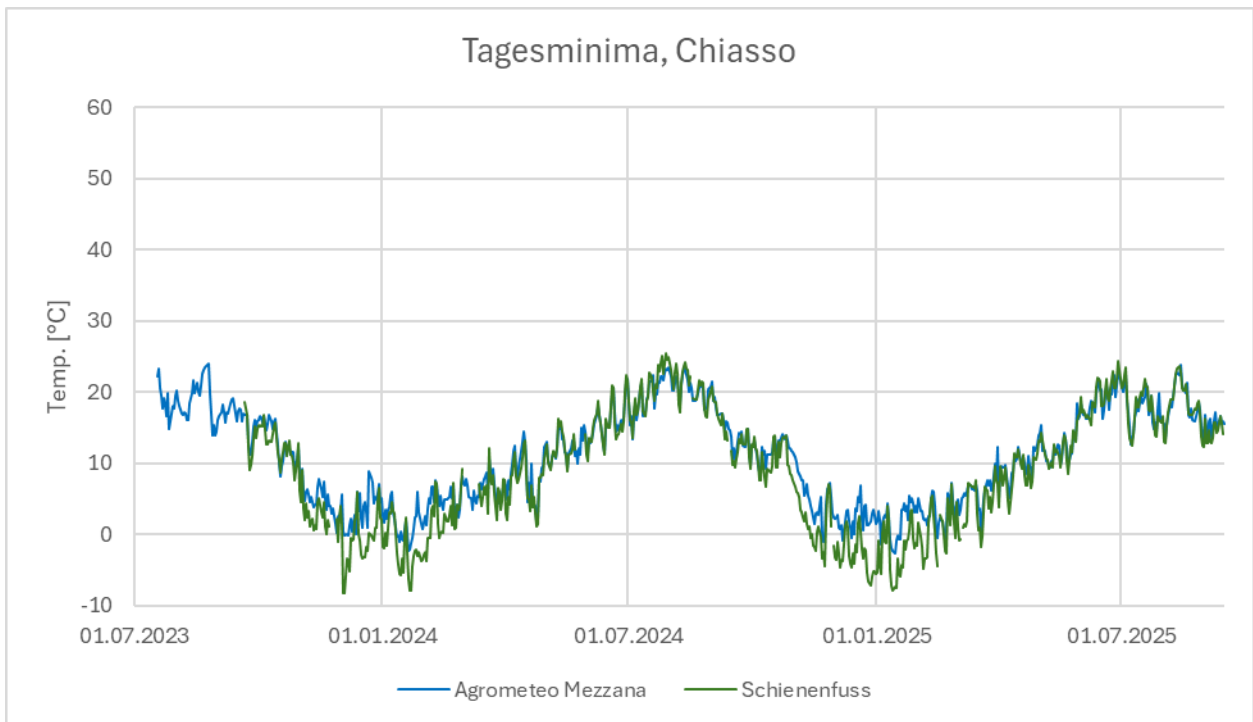


Abbildung 47 Tagesminima Chiasso

Die Messdaten zeigen an Schönwettertagen einen linearen Zusammenhang zwischen den Temperaturen von Schiene, Schotter und Luft. Die nachfolgenden Diagramme stellen diesen Zusammenhang für unterschiedliche Messstandorte der Lufttemperaturen dar.

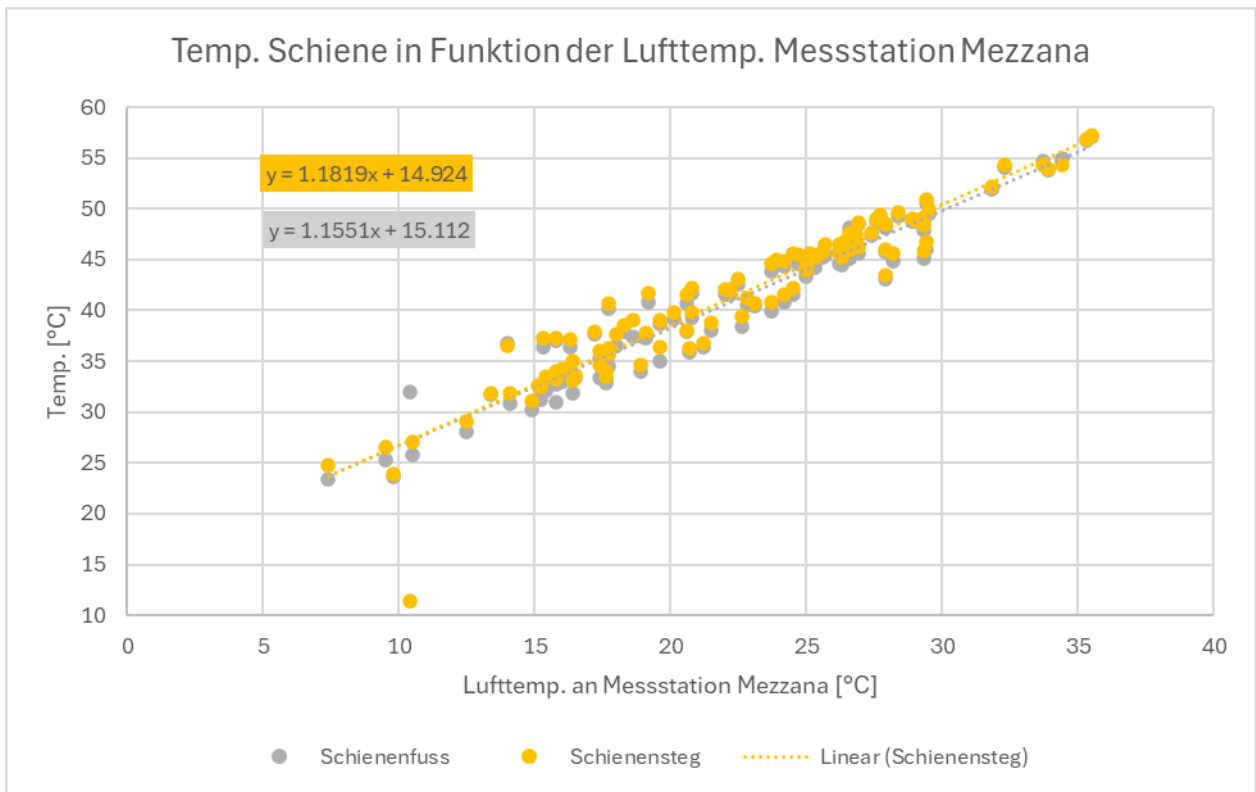


Abbildung 48 Regression Schiene Chiasso (Mezzana)

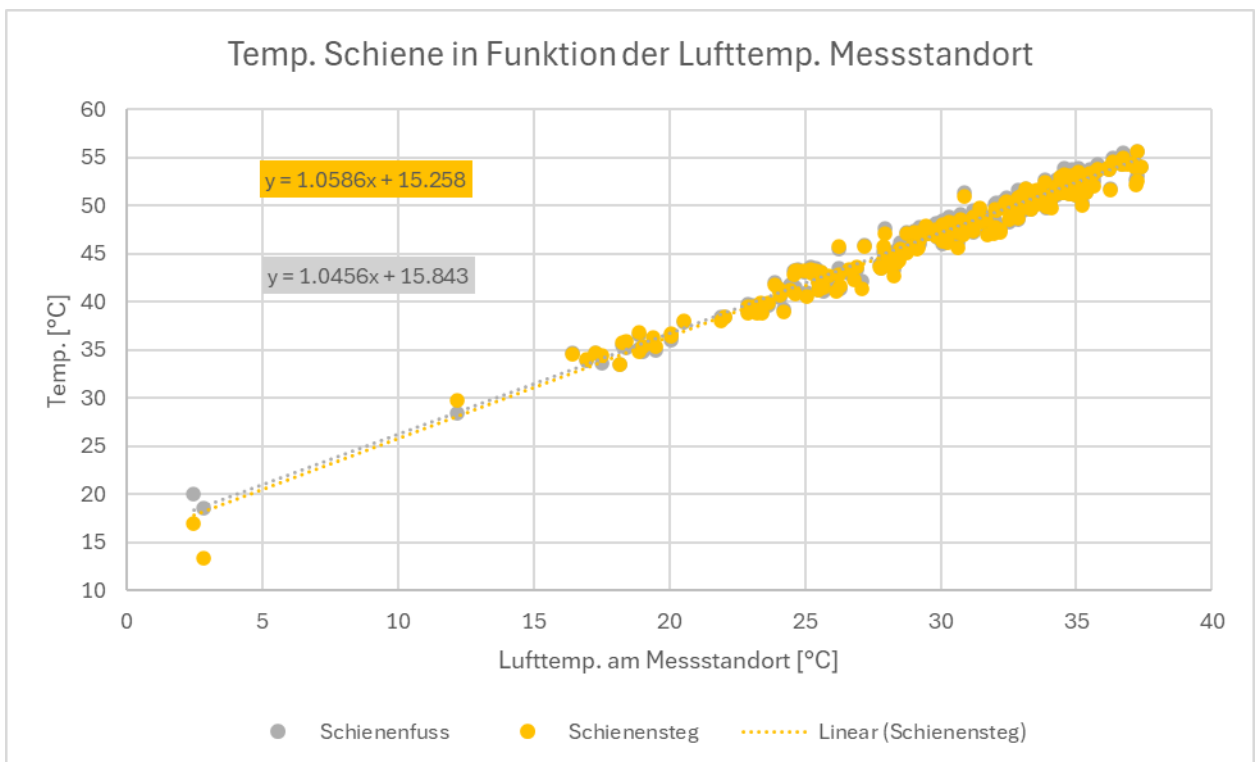


Abbildung 49 Regression Schiene Chiasso (Messstandort)

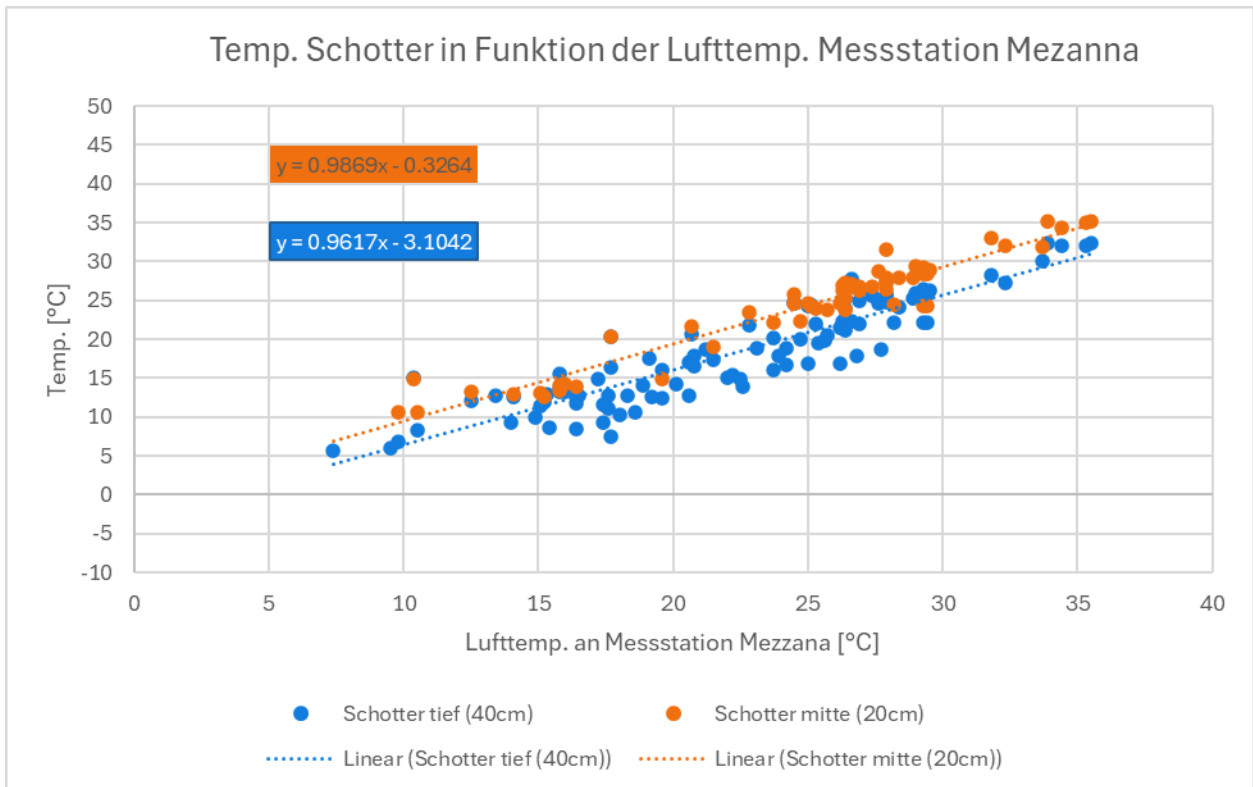


Abbildung 50 Regression Schotter Chiasso (Mezzana)

Abbildung 51 zeigt die Mittelwerte der gemessenen maximalen Temperaturen an verschiedenen Positionen der Referenzschiene (Schienenfuss, Schienensteg, Schienenkopf) unter sonnigen Bedingungen in Chiasso.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das Betriebsgleis im Mittel um etwa 5 °C höhere Temperaturen aufweist als die Referenzschiene. Am Schienenfuss und am Schienensteg des Betriebsgleises wurden mit rund 44.7 °C die höchsten Werte gemessen, während die Referenzschiene je nach Messpunkt zwischen 38.8 °C und 40.6 °C erreichte.

Innerhalb der Referenzschiene sind die Temperaturunterschiede gering, was auf eine gleichmässige Erwärmung des gesamten Profilquerschnitts hinweist. Zudem zeigen die Messungen am Schienenkopf (horizontal und vertikal) nahezu identische Werte.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die thermische Erwärmung des Betriebsgleises deutlich höher ist als jene der Referenzschiene. Vermutlich spielen dabei die grösseren relativen Wärmeverluste der kurzen Schiene über ihre Enden eine entscheidende Rolle, sodass sie trotz schnellerem Aufheizen tiefere Maximaltemperaturen erreicht als die lange, kontinuierliche Betriebschiene.

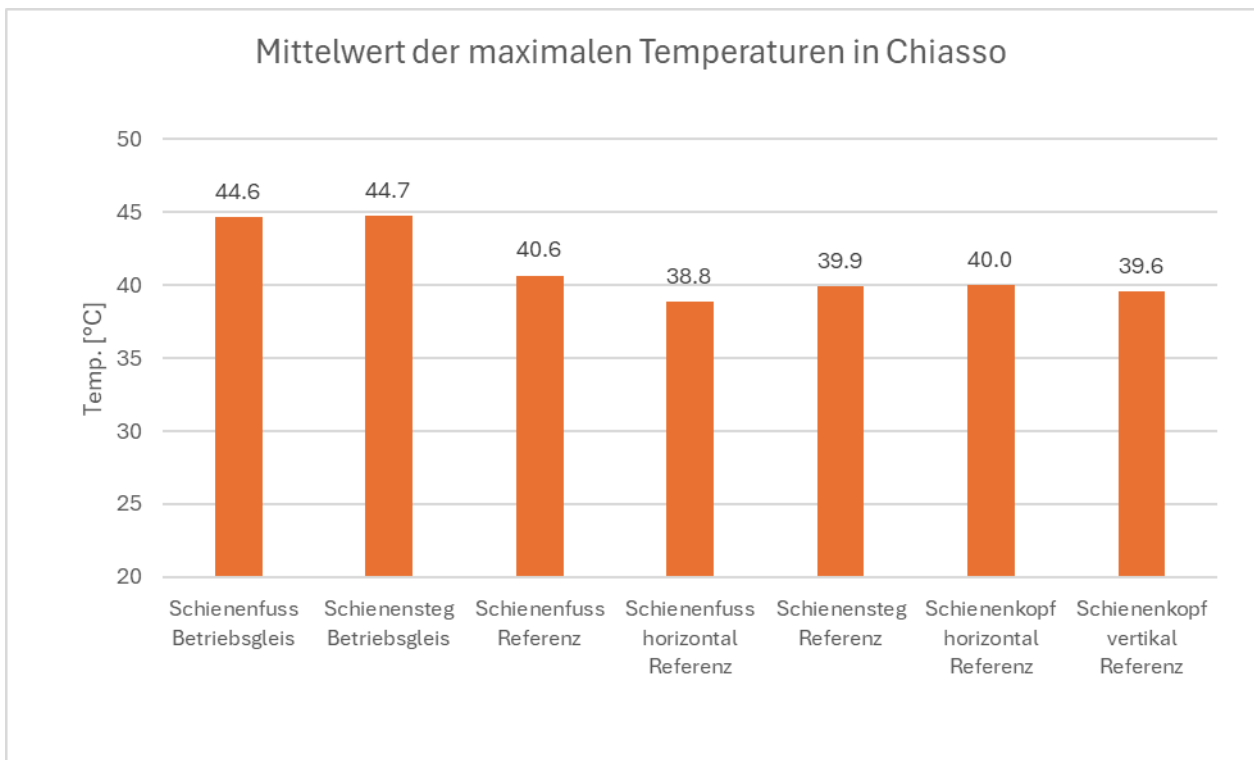


Abbildung 51 Mittelwert der maximalen Temperaturen in Chiasso

5.2.6. Lugano

Die Schienenfusstemperatur erreichte am 28.06.2025 einen Maximalwert von 58.2 °C. Zum Zeitpunkt dieser Messung lag die Lufttemperatur bei 33.1 °C. Die niedrigste Schienenfusstemperatur wurde am 15.01.2025 mit einem Wert von -7.3 °C festgestellt.

Die gemittelte Differenz der maximalen Lufttemperatur zwischen der Messstation Cademario und der gemessenen maximalen Lufttemperatur am Standort Lugano beträgt 5.0 °C. Dieser Wert liegt 2.6 °C über dem Durchschnitt der restlichen Messstandorte. Die Abweichung ist auf die signifikante Höhendifferenz zurückzuführen: Die Messstation Cademario befindet sich auf einer Höhe von ca. 500 m ü. M., während der Standort Lugano auf ca. 300 m ü. M. liegt.

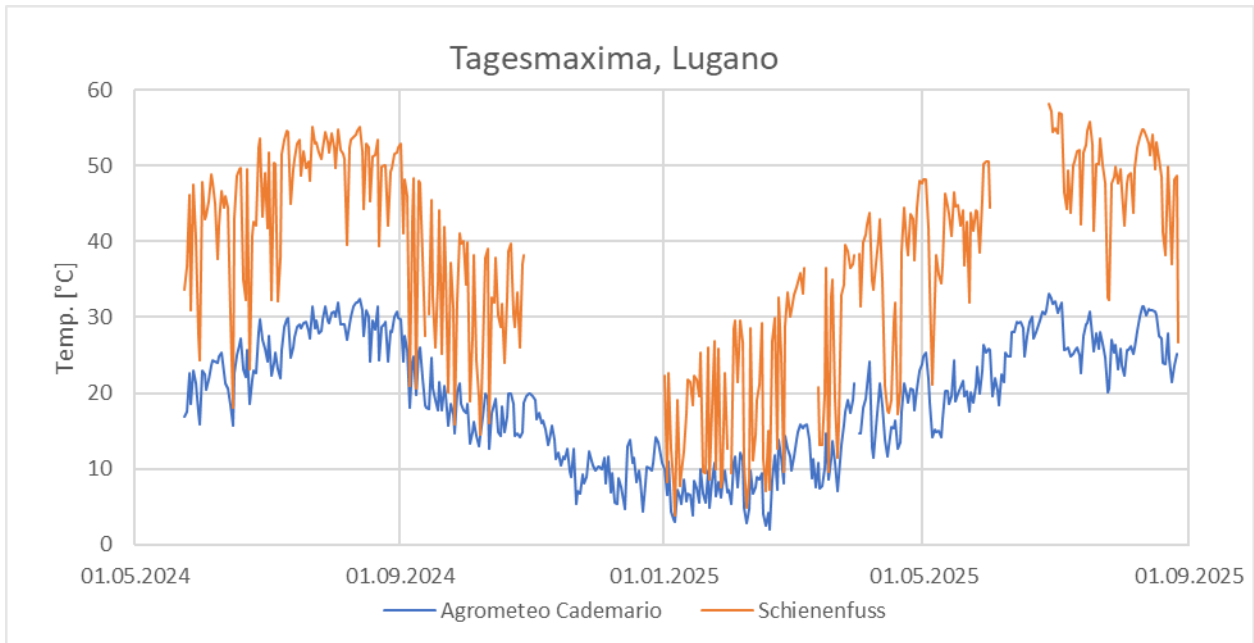


Abbildung 52 Tagesmaxima Lugano

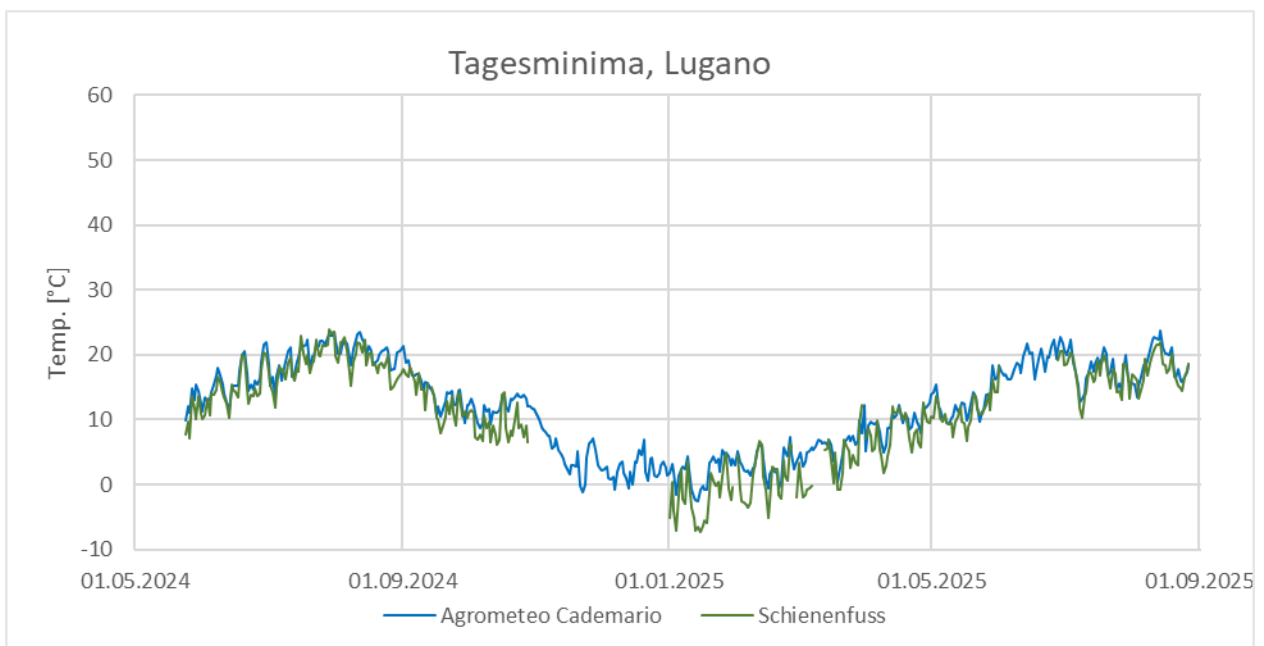


Abbildung 53 Tagesminima Lugano

Die Messdaten zeigen an Schönwettertagen einen linearen Zusammenhang zwischen den Temperaturen von Schiene, Schotter und Luft. Die nachfolgenden Diagramme stellen diesen Zusammenhang für unterschiedliche Messstandorte der Lufttemperaturen dar.

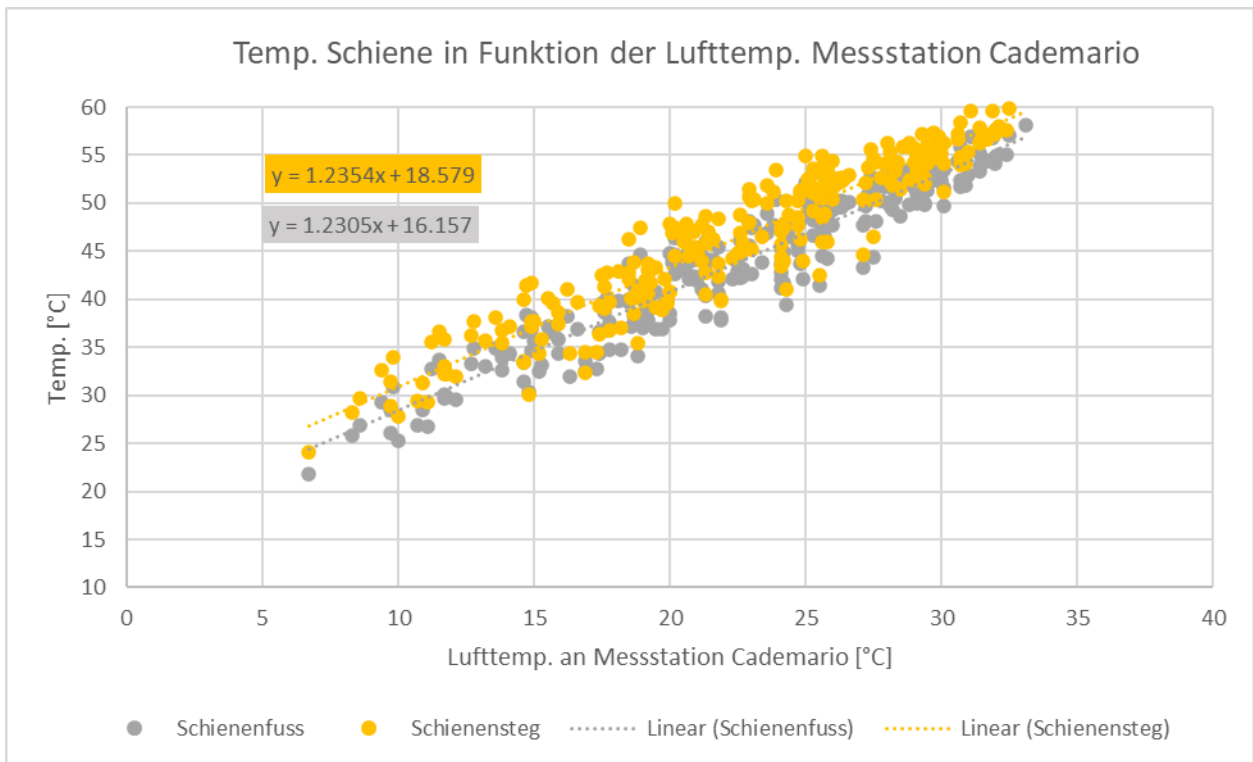


Abbildung 54 Regression Schiene Lugano (Cademario)

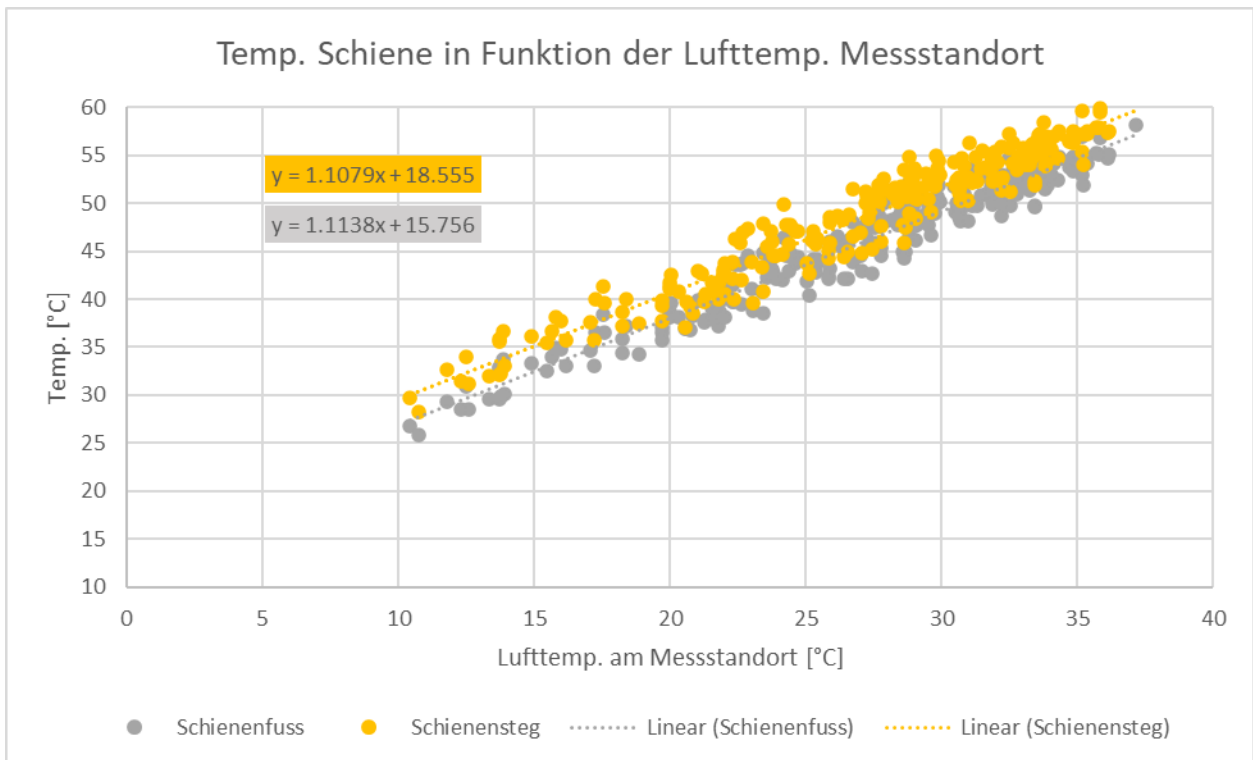


Abbildung 55 Regression Schiene Lugano (Messstandort)

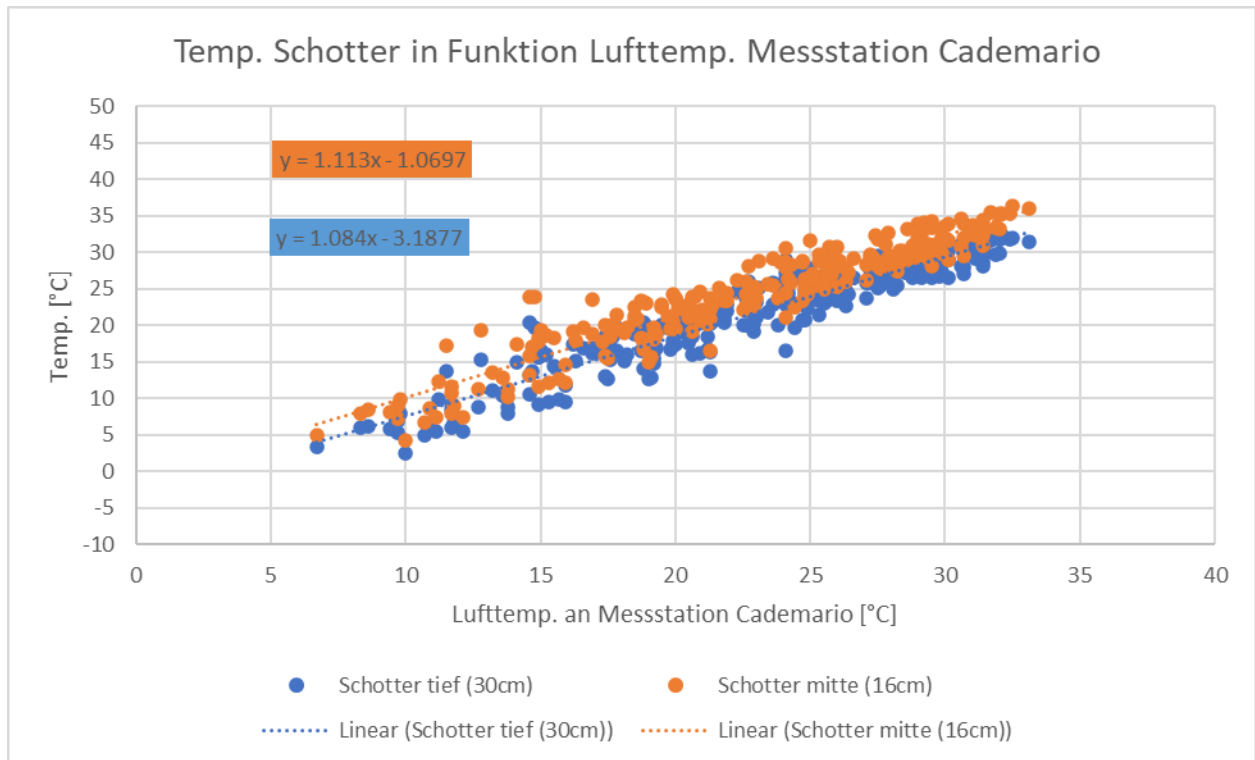


Abbildung 56 Regression Schotter Lugano (Cademario)

5.2.7. Luzern

Die Schienenfussstemperatur erreichte am 29.06.2025 einen Maximalwert von 56.3 °C. Zum Zeitpunkt dieser Messung lag die Lufttemperatur bei 32.6 °C. Die niedrigste Schienenfussstemperatur wurde am 12.01.2025 mit einem Wert von -6.6 °C festgestellt.

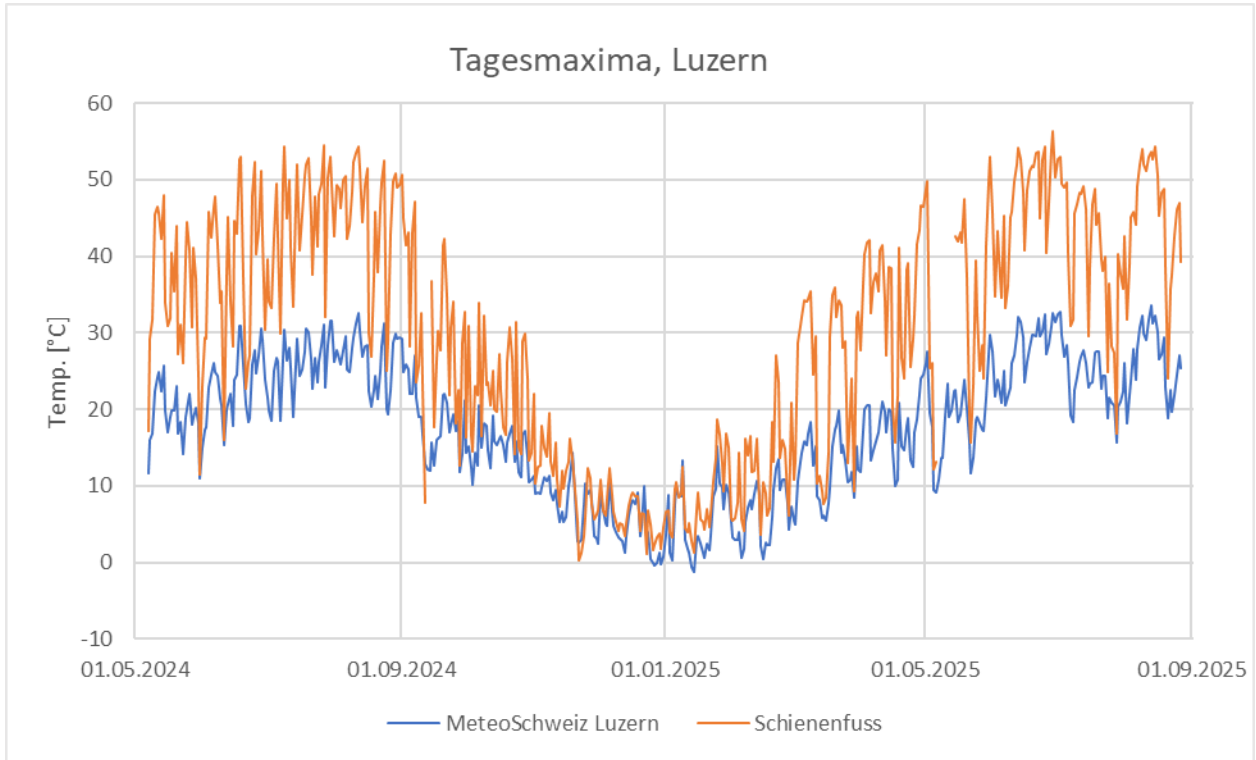


Abbildung 57 Tagesmaxima Luzern

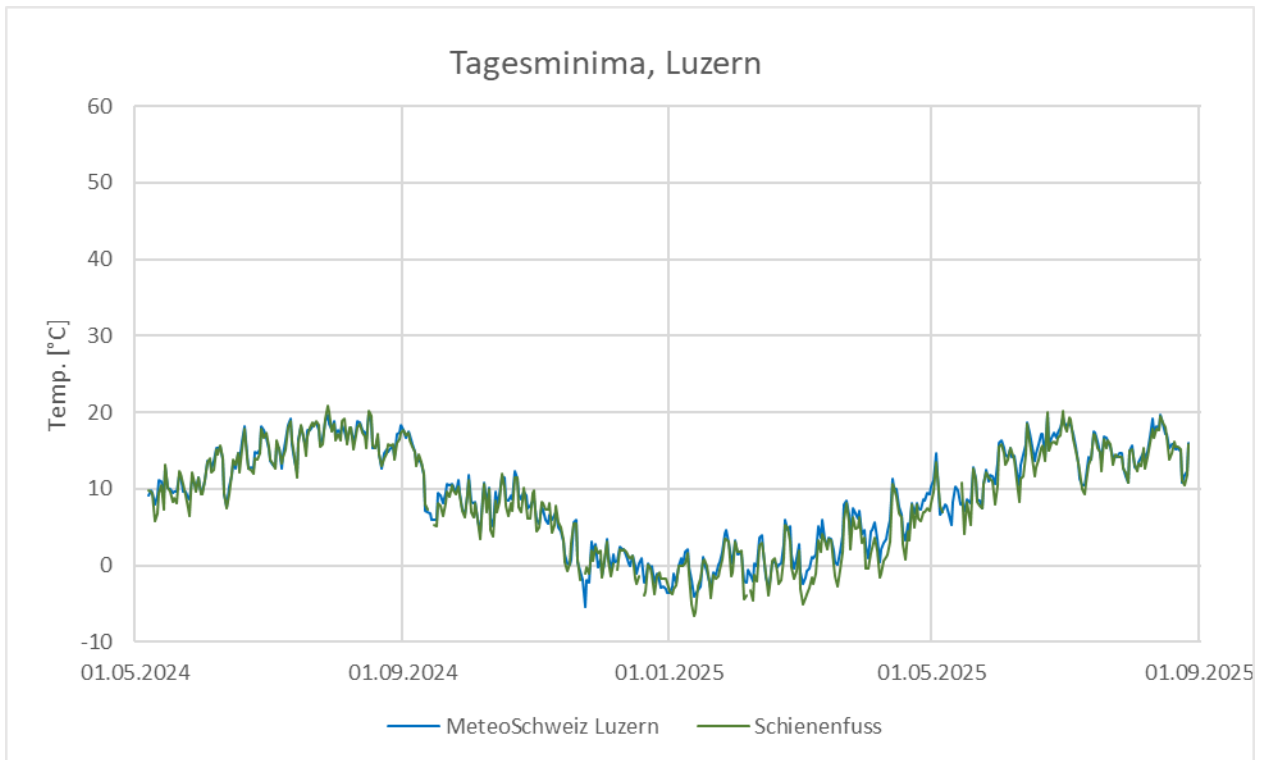


Abbildung 58 Tagesminima Luzern

Die Messdaten zeigen an Schönwettertagen einen linearen Zusammenhang zwischen den Temperaturen von Schiene, Schotter und Luft. Die nachfolgenden Diagramme stellen diesen Zusammenhang für unterschiedliche Messstandorte der Lufttemperaturen dar.

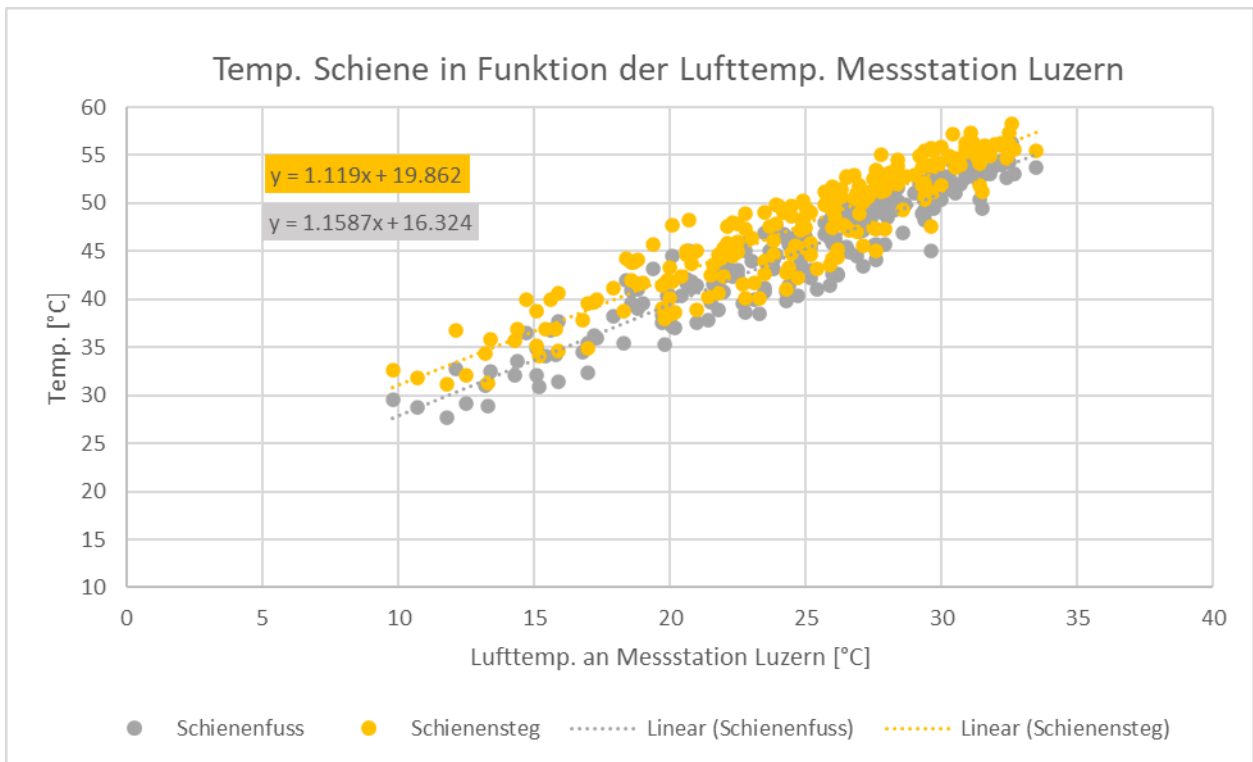


Abbildung 59 Regression Schiene Luzern (Luzern)

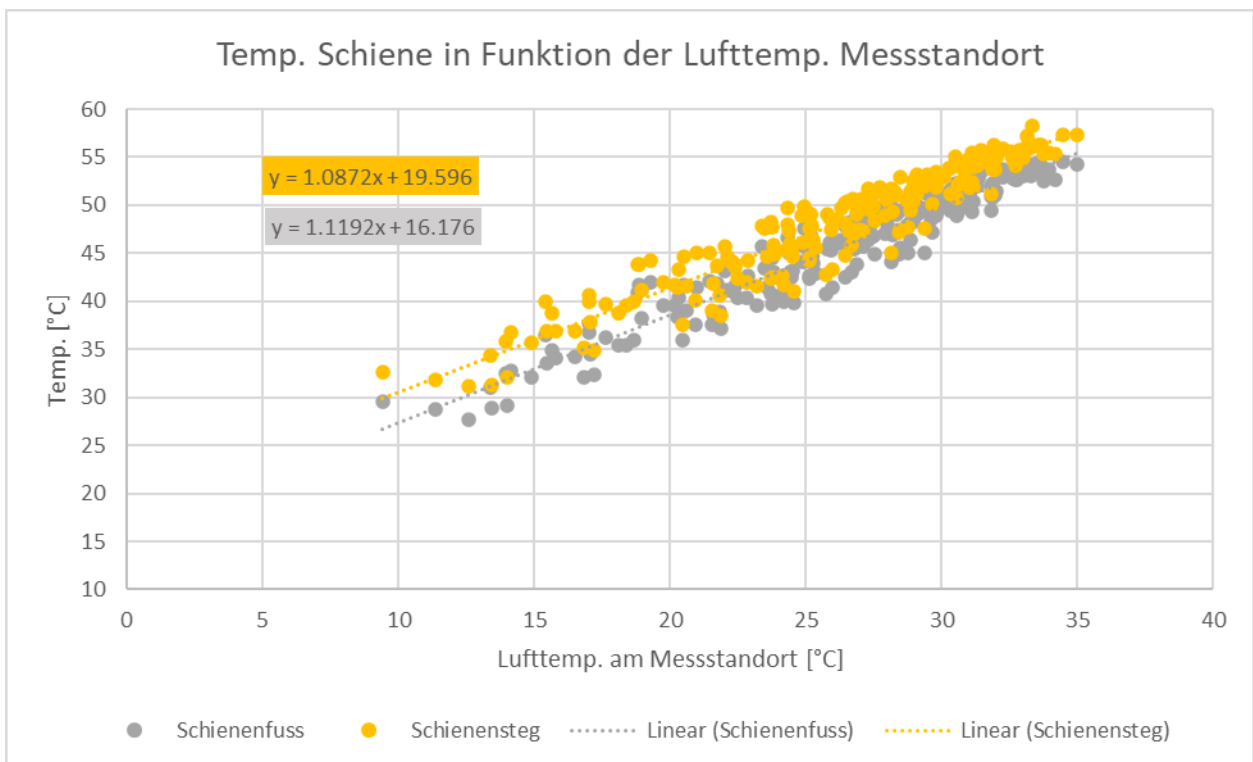


Abbildung 60 Regression Schiene Luzern(Messstandort)

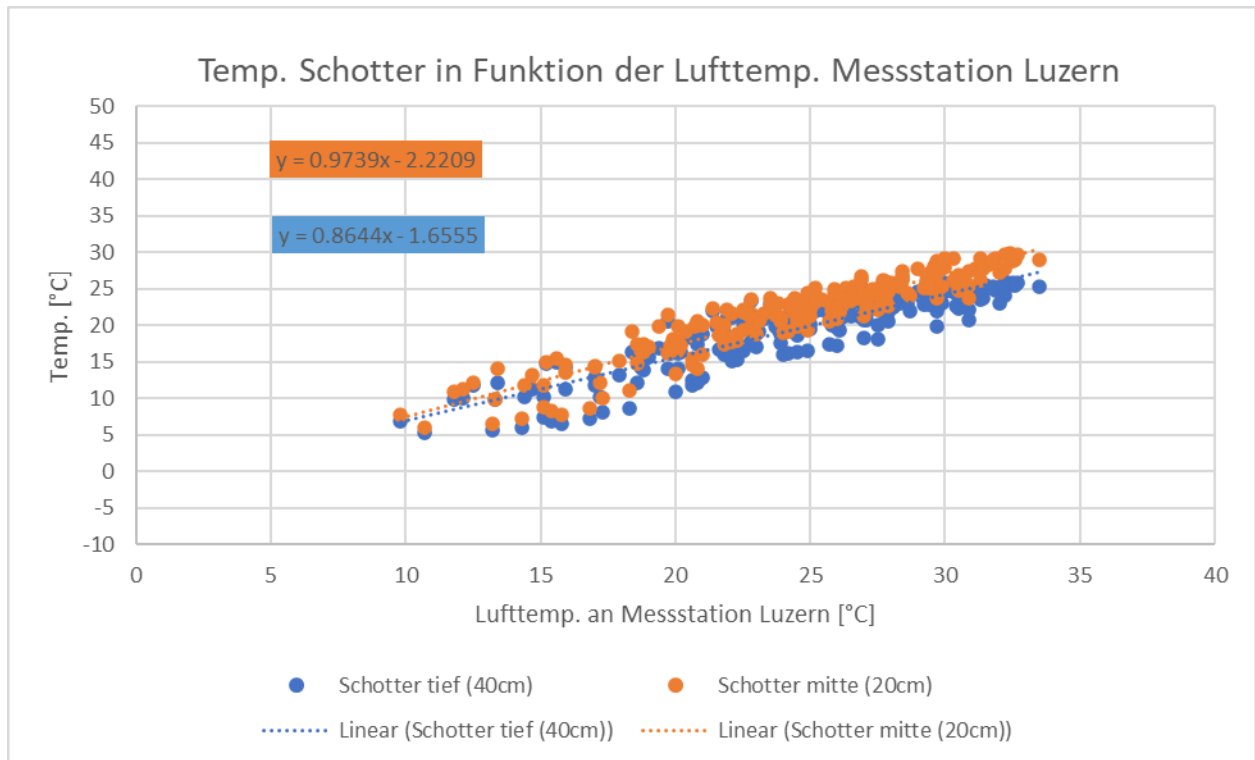


Abbildung 61 Regression Schotter Luzern (Luzern)

6. Schlussfolgerung

Die Messkampagne zur Bestimmung der Neutralisationstemperatur an sieben ausgewählten Standorten zeigt ein konsistentes Bild der thermischen Beanspruchung der Schienen unter realen Betriebsbedingungen.

Die gemessenen Schienentemperaturen erreichten an sonnigen Tagen maximale Werte zwischen 52 °C und 58 °C, während die gleichzeitigen Lufttemperaturen bei 33 °C bis 36 °C lagen. An allen Standorten zeigte sich ein stabiler, nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Luft- und der Schienentemperatur.

Die minimal gemessenen Schienentemperaturen lagen, abhängig vom Standort, zwischen -6 °C und -11 °C. Zusammen mit den Maximalwerten ergibt sich daraus eine repräsentative Spannweite der thermischen Beanspruchung, welche die tatsächlichen Betriebsbedingungen über die gesamte Messperiode abbildet.

Die lokale Lufttemperatur in Gleisnähe liegt im Mittel etwa 2.4 °C über den Werten der nächstgelegenen Wetterstationen, was auf die unmittelbare Erwärmung durch die Umgebung (Schotterbett, Gleise, Stahlbauteile) zurückzuführen ist. Für die Berechnung der Regressionsbeziehungen wurden ausschliesslich Tagesmaxima bei direkter Sonneneinstrahlung berücksichtigt, also jene Bedingungen, unter denen die grössten temperaturbedingten Längsspannungen der Schiene auftreten.

Der Vergleich zwischen Betriebs- und Referenzschiene in Chiasso bestätigt die Reproduzierbarkeit der Messresultate und die Homogenität der Messmethodik. Die maximalen Temperaturen des Betriebsgleises liegen im Mittel um etwa 5 °C über jenen der Referenzschiene. Diese Differenz ist auf unterschiedliche Einstrahlungs- und Wärmeabgabebedingungen zurückzuführen und belegt, dass die Sensorik die realen thermischen Verhältnisse zuverlässig erfasst.

Die Differenz zwischen den maximalen Temperaturen, gemessen am Schienenfuss und am Schienensteg, liegt bei einer Lufttemperatur von 30 °C zwischen -0.4 °C und +2.6 °C, abhängig von der Sonneneinstrahlung. Es ist daher ratsam, die Schienentemperatur zur Bestimmung der Neutralisationstemperatur an der Unterseite des Schienenfusses zu messen. Diese Stelle ist jedoch schwer zugänglich und kann – sofern die Messung in der Nacht oder ohne direkte Sonneneinstrahlung erfolgt – durch eine Messung am Schienensteg zuverlässig ersetzt werden. Eine Messung mit einem taktilen Thermometer ist dabei zu bevorzugen, da der Zustand der Schienoberfläche (trocken, nass, blank, rostig) einen starken Einfluss auf die Reflexion der Infrarotstrahlung hat und somit die gemessene Temperatur deutlich verfälschen kann.

Insgesamt erlauben die erhobenen Daten eine realistische Einschätzung der thermischen Spannweiten und der maximalen Schienentemperaturen unter Schweizer Klimabedingungen. Diese Werte können als Grundlage für die Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung der Neutralisationstemperaturen in vergleichbaren Streckenabschnitten dienen.

A. Anhangsverzeichnis

Auswertung_2023_2025_Basel_PB.xlsx
 Auswertung_2023_2025_Chiasso.xlsx
 Auswertung_2023_2025_Pratteln.xlsx
 Auswertung_2023_2025_Thurbrücke.xlsx
 Auswertung_2023_2025_Visp.xlsx
 Auswertung_2024_2025_Lugano.xlsx
 Auswertung_2024_2025_Luzern.xlsx
 Zusammenfassung.xlsx

B. Abkürzungsverzeichnis

PB Personenbahnhof

C. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Max. und min. Schienenfusstemperatur	3
Abbildung 2	Messstandort Thurbrücke	5
Abbildung 3	Sensorpositionen Thurbrücke	6
Abbildung 4	Gleissensoren Thurbrücke	6
Abbildung 5	Lufttemperatursensor Thurbrücke	6
Abbildung 6	Messstandort Pratteln	7
Abbildung 7	Sensorpositionen Pratteln, Basel, Visp, Lugano, Luzern	8
Abbildung 8	Datenlogger Pratteln	8
Abbildung 9	Lufttemperatursensor Pratteln	8
Abbildung 10	Messstandort Basel PB	9
Abbildung 11	Schienensensoren Basel PB	9
Abbildung 12	Lufttemperatursensor Basel PB	9
Abbildung 13	Messstandort Visp	10
Abbildung 14	Schienensensoren Visp	10
Abbildung 15	Lufttemperatursensor Visp	10
Abbildung 16	Messstandort Chiasso	11
Abbildung 17	Sensorpositionen Chiasso	12
Abbildung 18	Schienensensoren Chiasso (mit Referenzschiene rechts)	12
Abbildung 19	Lufttemperatursensor Chiasso	12
Abbildung 20	Messstandort Lugano	13
Abbildung 21	Schienensensoren Lugano	13
Abbildung 22	Lufttemperatursensor Lugano	13
Abbildung 23	Messstandort Luzern	14
Abbildung 24	Schienensensoren Luzern	14
Abbildung 25	Lufttemperatursensor Luzern	14
Abbildung 26	Tagesmaxima Thurbrücke	16
Abbildung 27	Tagesminima Thurbrücke	16
Abbildung 28	Regression Schiene Thurbrücke (Uesslingen)	17
Abbildung 29	Regression Schiene Thurbrücke (Messstandort)	17
Abbildung 30	Regression Metallträger Thurbrücke (Uesslingen)	18
Abbildung 31	Tagesmaxima Pratteln	19
Abbildung 32	Tagesminima Pratteln	19
Abbildung 33	Regression Schiene Pratteln (Olsberg)	20
Abbildung 34	Regression Schiene Pratteln (Messstandort)	20
Abbildung 35	Regression Schotter Pratteln (Olsberg)	21
Abbildung 36	Tagesmaxima Basel PB	22

Abbildung 37	Tagesminima Basel PB.....	22
Abbildung 38	Regression Schiene Basel PB (Basel-Binningen)	23
Abbildung 39	Regression Schiene Basel PB (Messstandort).....	23
Abbildung 40	Regression Schotter Basel PB (Basel-Binningen).....	24
Abbildung 41	Tagesmaxima Visp	25
Abbildung 42	Tagesminima Visp	25
Abbildung 43	Regression Schiene Visp (Visp).....	26
Abbildung 44	Regression Schiene Visp (Messstandort)	26
Abbildung 45	Regression Schotter Visp (Visp)	27
Abbildung 46	Tagesmaxima Chiasso	28
Abbildung 47	Tagesminima Chiasso	28
Abbildung 48	Regression Schiene Chiasso (Mezzana)	29
Abbildung 49	Regression Schiene Chiasso (Messstandort).....	29
Abbildung 50	Regression Schotter Chiasso (Mezzana).....	30
Abbildung 51	Mittelwert der maximalen Temperaturen in Chiasso.....	31
Abbildung 52	Tagesmaxima Lugano	32
Abbildung 53	Tagesminima Lugano	32
Abbildung 54	Regression Schiene Lugano (Cademario)	33
Abbildung 55	Regression Schiene Lugano (Messstandort)	33
Abbildung 56	Regression Schotter Lugano (Cademario).....	34
Abbildung 57	Tagesmaxima Luzern	35
Abbildung 58	Tagesminima Luzern	35
Abbildung 59	Regression Schiene Luzern (Luzern).....	36
Abbildung 60	Regression Schiene Luzern(Messstandort)	36
Abbildung 61	Regression Schotter Luzern (Luzern)	37

D. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Messzeitraum	15
-----------	--------------------	----