

Klimatische Grundlagen der Schweiz für die SHRP-Bitumenklassifikation

**Données de bases du climat en Suisse pour la
classification des bitumes selon SHRP**

**IMP Bautest AG, Oberbuchsitzen
Ch. Angst, Dr. sc. techn.**

**Meteotest, Bern
J. Remund, dipl. Natw. ETH**

**Forschungsauftrag 2/97 auf Auftrag der
Verreinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)**

August 2000

Klimatische Grundlagen der Schweiz für die SHRP-Bitumenklassifikation

Données de bases du climat en Suisse pour la classification des bitumes selon SHRP

**Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
Bundesamt für Strassen
Forschungsauftrag 2/97**

**Ch. Angst, Dr. sc. techn., IMP Bautest AG, Oberbuchsitzen
J. Remund, dipl. Natw. ETH, Meteotest, Bern**

INHALTSVERZEICHNIS

1. ZUSAMMENFASSUNG	2
2. PROBLEMSTELLUNG	4
2.1 Ausgangslage	4
2.2 Zielsetzung	5
3. GRUNDLAGEN	6
3.1 Das SHRP-Programm	6
3.2 SHRP Bitumenklassifikation	7
4. KLIMADATEN	10
4.1 Methode	10
4.1.1 Konzept	10
4.1.2 Berechnung der Ausgangsdaten der Lufttemperatur an 10 Stationen	12
4.1.3 Generierung der Luft- und Bodentemperaturen an 64 Stationen	14
4.1.4 Korrektur der generierten Daten	16
4.1.5 Messungen im Kanton Luzern	18
4.1.6 Minimumtemperaturen an der Strassenoberfläche	19
4.1.7 Maximumtemperaturen im Boden	22
4.1.8 Interpolation	25
4.1.9 Berechnung der 50% und 95% Quantile	28
4.1.10 Berechnung der Bitumenklassen (Performance Grade)	29
5. ERGEBNISSE	30
6. ANWENDUNG	37
6.1 Zur Wahl der Vertrauensgrenze (Zuverlässigkeit)	37
6.2 Leitfaden der Berechnung der Klimadaten	38
6.3 Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung	42
6.4 Vergleich der SHRP-Bitumenklassifikation mit europäischen Bitumensorten	43
7. LITERATUR	44

1. Zusammenfassung

Die Wahl der bituminösen Bindemittel für die Herstellung von Strassenbelägen wird bisher -basierend auf den Erfahrungen- empirisch vorgenommen. Dieses System kann teilweise nicht mehr angewendet werden, da neue Produkte/Verfahren auf den Markt drängen, bei denen die entsprechenden Erfahrungen fehlen. Zudem stösst das System an Grenzen infolge der zunehmenden Verkehrsbelastung welche die Reserven der Bauweisen in Anspruch nehmen.

Im Rahmen des Strategic Highway Research Program, SHRP wurde ein völlig neuer Ansatz gewählt. Treu dem Grundsatz von SHRP "weg von empirischen Verfahren", sollte die Wahl des Bindemittels auf sogenannte leistungsorientierte Anforderungen basieren. Damit sind Anforderungen an Baustoffe und Beläge gemeint, die das Gebrauchsverhalten eines Belages charakterisieren.

Dass die klimatischen Verhältnisse auf einem Objekt eine wesentliche Rolle spielen ist nichts neues. Neu ist jedoch die systematische Erfassung und Auswertung von Klimadaten, welche den Strassenbauern zur Verfügung gestellt werden. Das Ziel des Forschungsauftrages bestand darin, gesamtschweizerisch Klimadaten für die Beanspruchung bei hohen und bei tiefen Temperaturen zu erarbeiten. Die im Rahmen der SHRP- Bitumenklassifikation verwendeten klimatischen Informationen für die Maximaltemperatur sowie der Minimaltemperatur sollen erarbeitet werden.

Ausgehend von Wetterstationen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt SMA, sind Stundenwerte der Lufttemperaturen bei 31 Stationen zwei Meter über Grund bekannt. Gestützt auf 64 weitere Messstationen bei denen die Stundenwerte nicht bekannt sind, konnte mit einem Dimensionierungsprogramm für Solaranlagen METEONORM, die Stundenwerte für weitere 64 Stationen generiert werden. Mit einem Interpolationsmodell wurden die Temperaturen flächendeckend berechnet. Dabei wurde festgestellt, dass die Abhängigkeit der Temperatur von der Meereshöhe je nach Region in der Schweiz sehr unterschiedlich ist. Daher wurde die Schweiz in 8 Klimaregionen unterteilt, für welche entsprechende Modelle erarbeitet wurden.

Die Wetterstationen der SMA erfassen die Lufttemperatur 2 Meter über Grund und nicht die Bodentemperatur. Zur Umrechnung der Luft- in Bodentemperaturen konnten die im SHRP-Programm angegebenen Formeln nicht verwendet werden. Das nordamerikanische Klima ist wesentlich kontinentaler als in der Schweiz; in weiten Teilen liegen wesentlich höhere Globalstrahlungswerte vor. Auf den Nationalstrassen des Kantons Luzern wurden an 9 Messstationen die Bodentemperaturen gemessen. Anhand dieser Messstationen konnte ein Modell zur Berechnung der Bodentemperatur in der Schweiz erarbeitet werden. In Anlehnung an die, bei der Dimensionierung eines Strassenoberbaus üblichen Gebrauchsdauer von 20 Jahren, wurden die max. und min. Temperaturen berechnet, die alle 20 Jahre 1 Mal auftreten.

Als Ergebnis der Forschungsarbeit liegen nun kartographisch aufgearbeitete, flächendeckende Zahlen für die alle 20 Jahre einmal auftretenden max. und min. Temperaturen gemäss Definition SHRP vor. Zudem werden Lage-Korrekturwerte angegeben, um die mikroklimatischen Verhältnisse auf einem Objekt zu berücksichtigen (Beispielsweise Südhang, Mulde, Stadt, Wald, etc.). Es wurde auch eine Anleitung beschrieben, anhand welcher die klimatischen Daten objektbezogen berechnet werden.

Résumé

Le choix du liant bitumineux pour la confection de revêtements routiers est jusqu'à ce jour -en se basant sur l'expérience- effectué de façon empirique. Ce système ne peut être que partiellement appliqué, car de nouveaux produits / nouvelles méthodes se pressent sur le marché, pour lesquelles les expériences y référant font encore défaut. De plus, ce système est poussé à sa limite, suite à l'augmentation des contraintes du trafic, qui met à contribution les ressources des sciences de la construction.

Dans le cadre du programme Strategic Highway Research Programm(SHRP), une toute nouvelle approche a été choisie. Fidèlement au principe de SHRP "au-delà des procédés empiriques", le choix du liant bitumineux devrait aboutir en se basant sur les contraintes auxquelles ils seront soumis dans la chaussée. Ainsi les exigences des matériaux et des revêtements sont déterminées par les conditions d'emploi du revêtement.

Que les conditions climatiques sur un objet jouent un rôle important, cela n'a rien de nouveau. Cependant le recensement et le traitement systématique des données climatiques, ainsi que leur mise à disposition aux constructeurs de routes, constitue une idée nouvelle. Le but de ce mandat de recherche constitue à élaborer des données climatiques pour la sollicitation par hautes et basses températures sur l'ensemble de la Suisse, et de les mettre à disposition. Dans le cadre de la classification des bitumes selon SHRP, les informations climatiques doivent être mises au point.

Des valeurs horaires de la température de l'air à deux mètres au-dessus du sol, émanant de stations météorologiques de l'Institut Suisse de Météorologie ISM, sont connues pour 31 stations. Soutenu par 64 autres stations, pour lesquelles les valeurs horaires ne sont pas connues, il a été possible, grâce à un programme de dimensionnement pour les installations solaires METEONORM, de régénérer les valeurs horaires pour ces 64 autres stations. Grâce à un modèle d'interpolation, les températures sur l'ensemble de la Suisse ont été calculées. Lors de cette opération, il a été remarqué, que la dépendance de la température par rapport à l'altitude au-dessus du niveau de la mer, est très différente selon les régions de Suisse. Pour cette raison, la Suisse a été subdivisée en 8 régions climatiques, pour chacune desquelles, un modèle d'interpolation correspondant a été élaboré.

Les stations météorologiques de l'ISM enregistrent les température de l'air 2 mètres au-dessus du sol et non pas la température au sol. Les formules données dans le programme SHRP pour convertir les températures de l'air en températures au sol n'ont pas pu être employées. Le climat nord-américain est nettement plus continental que celui en Suisse ; pour beaucoup d'endroits, il y a des valeurs de rayonnement global essentiellement plus hautes. Neuf stations de mesure ont enregistré les températures au sol sur les routes nationales du canton de Lucerne. En rapport avec ces mesures, un modèle de calcul pour les températures au sol en Suisse a pu être ainsi établi.

Comme lors du dimensionnement de la superstructure des routes, qui prévoit usuellement une durée de vie de 20 ans, les températures min. et max. calculées, sont celles qui apparaissent également une fois chaque 20 ans.

Ce travail de recherche a abouti à la mise en valeur des températures min. et max., définies par le programme SHRP, qui apparaissent une fois chaque 20 ans, sous forme de représentations cartographiques des températures sur l'ensemble de la Suisse. De plus, des valeurs de correction, selon les emplacements, sont donnés afin de pouvoir prendre en considération les conditions micro-climatiques d'un objet (par exemple versant sud, cuvette, ville, forêt, etc.). Une directive y est également incluse, grâce à laquelle les données climatiques en fonction d'un objet peuvent être calculées.

2. Problemstellung

2.1 Ausgangslage

Seit über 100 Jahren werden bituminöse Bindemittel anhand einfacher, empirischer Versuche (allen voran die Penetration bei 25°C) klassifiziert. Die Wahl eines Bindemittels für ein bestimmtes Bauobjekt erfolgt unter Berücksichtigung der Beanspruchung (Verkehr, Klima) aufgrund von Laborversuchen die häufig bei einer bestimmten Temperatur durchgeführt werden. Je nach Beanspruchung werden unterschiedliche Anforderungen (beispielsweise Penetrationswerte) festgelegt. Die Berücksichtigung der klimatischen Verhältnisse eines Objektes erfolgt in der Regel aufgrund der Erfahrung der projektierenden Ingenieure.

Einige Tiefbauämter, vorab in Bergregionen, haben interne Vorschriften für die Wahl der Bindemittelsorten bei denen die Höhenlage des Objektes berücksichtigt wird. Diese Vorschriften sind aufgrund langjähriger Erfahrungen entstanden.

Dieses System stösst bei der Verwendung von polymermodifizierten Bindemitteln, von Spezialbindemitteln und neuer Entwicklungen an Grenzen, da keine langjährige Erfahrungen vorliegen. Zudem liegt es weitgehend im Ermessen des Ingenieurs, welches Bindemittel er für welche klimatischen Bedingungen einsetzen möchte.

Das SHRP [1, 2, 3, 4] hat einen völlig neuen Ansatz zur Wahl der Bindemittel in Abhängigkeit des Klimas vorgeschlagen. Für alle Bindemittel werden die gleichen Eigenschaften gefordert; diese sind jedoch bei unterschiedlichen Temperaturen zu erreichen. Dabei werden Anforderungen sowohl an hohe (Sommer) wie auch an tiefe (Winter) Temperaturen formuliert. Die Temperatur bei welchen die entsprechenden Eigenschaften zu erreichen sind, stehen in Relation zu den Klimadaten des Bauobjektes. Diese Daten wurden für die USA und Kanada in Karten aufgearbeitet, so dass im Strassenbau die Wahl des Bindemittels aufgrund dieser Karten festgelegt werden kann. Dadurch wird es erstmals möglich, die Berücksichtigung der Objekttemperaturen bei der Wahl eines Bindemittels einheitlich zu Regeln.

2.2 Zielsetzung

In der Schweiz werden seit einigen Jahren Anstrengungen von privaten und staatlichen Instituten unternommen, um von den Ergebnissen des SHRP-Projektes zu profitieren. Es darf nicht vergessen werden, dass das SHRP-Projekt als das weltweit grösste Strassenbauforschungsprojekt aller Zeiten bezeichnet wird (150 Mio. US-\$). Für die Umsetzung der SHRP-Ergebnisse in die schweizerische Strassenbaupraxis sind Kenntnisse über die klimatologischen Bedingungen erforderlich.

Die bisherigen Arbeiten zur Umsetzung der SHRP-Ergebnisse haben zum Ziel, einzelne Laborprüfmethoden zu untersuchen. Ohne Erarbeitung der von SHRP formulierten kritischen Temperaturen für die Schweiz, kann die SHRP-Philosophie als Ganzes keinen Eingang in die Praxis finden.

Im vorliegenden Forschungsauftrag sollen diese kritischen Temperaturen (Sommer/Winter) für die schweizerischen Verhältnisse erarbeitet, und in Karten dargestellt werden.

Es soll eine Klassifikation der Bindemittel für Strassenbeläge gemäss dem "Strategic Highway Research Program" (SHRP) für die Schweiz ermöglicht werden. Dazu sind folgende 3 klimatische Informationen flächendeckend erforderlich:

- Durchschnitt der Tagesmaxima der Belagstemperatur der heissesten 7-Tagesperiode in Tiefen von 2 und 7 cm (Maximumtemperaturen).
- Tiefste Temperatur an der Oberfläche gemessen (Minimumtemperatur).

Die 3 Parameter Maximumtemperatur in 2 cm und 7 cm Tiefe und die Minimumtemperatur werden anhand von Temperaturmessungen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt SMA und von Messungen an Strassen aufgearbeitet und abgeleitet, räumlich interpoliert und kartographisch dargestellt.

3. Grundlagen

3.1 Das SHRP-Programm

Im April 1987 beschloss der US-amerikanische Kongress $\frac{1}{4}$ % des jährlichen Bundesbudgets für Strassenbau, 5 Jahre lang der Forschung zur Verfügung zu stellen [1]. Mit diesem -im Vergleich zum Gesamtbudget lächerlich kleinen- Betrag wurde ein weltweiter Innovationsschub in der Strassenbautechnologie ausgelöst, denn es standen Gelder in bisher unbekanntem Ausmass zur Verfügung. Insgesamt wurden in den Jahren 1988 bis 1993 150 Mio. US-\$ in die Strassenbauforschung gesteckt. Ca. 100 Mio. US-\$ flossen in Projekte zu den Themen „Asphalt“ und „bit. Bindemittel“. Dieses grösste Forschungsprojekt in der Geschichte des Strassenbaus wurde Strategic Highway Research Programm SHRP genannt.

Die Ergebnisse lösten weltweite Diskussionen aus [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], denn die Amerikaner beschränkten teilweise völlig neue Wege. Es war ihnen auch nicht möglich in dieser kurzen Zeit genügend praktische Erfahrungen mit den teilweise neu entwickelten Prüfmethoden zu sammeln. In einigen Ländern wurden SHRP-ähnliche Grossprojekte mit dem Ziel gestartet die SHRP-Methoden den bisherigen Methoden gegenüber zu stellen sowie Erfahrungen zu sammeln [9, 10].

Eines der ursprünglichen Ziele von SHRP war es unter Anderem, den Nachweis zu erbringen, dass Forschungsprojekte ziel- und terminorientiert durchgeführt werden können. Man glaubte zu Beginn des Projektes, dass nach Beendigung der Arbeiten kein weiterer Handlungsbedarf in der Forschung bestehen würde.

Obwohl das SHRP-Projekt 1992 im Prinzip zu Ende war, mussten auch die Amerikaner einsehen, dass nicht alle Fragen beantwortet wurden. In sog. Post-SHRP-Projekten wird, mit reduzierten Mitteln, an einigen Fragestellungen weiter gearbeitet.

3.2 SHRP Bitumenklassifikation

Das Schlüsselwort für die Entwicklung der Prüfverfahren und Bitumenspezifikationen in der SHRP-Forschung war der Begriff „performance“. Dabei wurde zwischen performance-related und performance-based unterschieden [2].

performance-related :

Eigenschaften und Verfahren die das Gebrauchsverhalten eines Belages charakterisieren, das Gebrauchsverhalten selbst jedoch nicht steuern oder bestimmen. Hierzu gehören die empirischen Anforderungen an den Bindemittelgehalt, die Hohlraumgehalte und Hohlraumfüllungsgrade im Gyrator-Versuch.

performance-based :

Eigenschaften und Verfahren mit denen die Leistungsfähigkeit und das Gebrauchsverhalten von Asphaltbelägen direkt beschrieben werden.

Für die SHRP-Bitumenklassifikation spielen die „performance-based specifications“ eine entscheidende Rolle. Es war das erklärte Ziel von SHRP leistungsorientierte Anforderungen zu definieren, um von den rein empirischen Merkmalen wie Erweichungspunkt Ring und Kugel, Marshallstabilität etc. abzurücken.

Die Wahl der Bitumensorte erfolgt bisher aufgrund empirischer Laborversuche sowie auf der Basis von Erfahrungen in der Praxis. Dieses Vorgehen geht solange gut, als entweder Erfahrungen vorliegen, oder Plausibilitätsüberlegungen und Analogien weiterhelfen. Infolge der stetigen Zunahme der Verkehrsbeanspruchung steigen auch die Anforderungen an die Baustoffe, so dass je länger je weniger zwischen bekannten Fällen *interpoliert* werden kann; die Wahl erfolgt durch *Extrapolation* mit entsprechend grösserer Unsicherheit. Neben der steigenden Verkehrsbeanspruchung werden neue Baustoffe und Verfahren eingesetzt, bei denen eine entsprechende Langzeiterfahrung fehlt. Die empirischen Methoden erreichen ihre Grenzen; der Handlungsbedarf für leistungsorientierte Anforderungen ist gegeben.

Die neuen Anforderungen sollen direkt mit dem Gebrauchsverhalten in der Praxis korreliert sein. Ob dieses hohe Ziel erreicht wurde wird die Zukunft zeigen. Immerhin wurden die Anforderungen systematisch und nachvollziehbar hergeleitet.

Die SHRP-Anforderungen wurden so formuliert, dass für jede als wesentlich erkannte Eigenschaft eine Prüfmethode zur Verfügung steht:

Eigenschaft

Sicherheit
Verarbeitbarkeit
Spurrinnen
Ermüdungsrisse
Kälteverhalten
Alterung

Laborprüfung

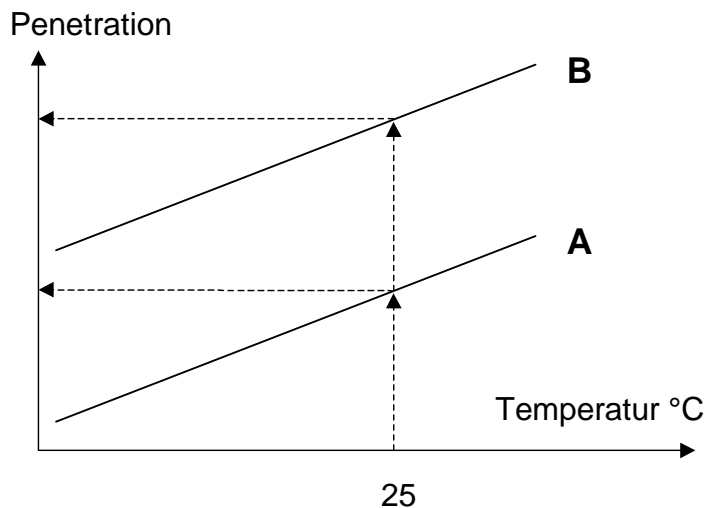
Flammpunkt
Viskosität
dynamischer Scher-Rheometer DSR
dynamischer Scher-Rheometer DSR
Bending Beam Rheometer
Pressure Aging Vessel PAV

Anhand von Berechnungsmodellen wurden für die einzelnen Eigenschaften kritische Werte definiert, bei deren Überschreiten Misserfolge zu erwarten sind (Risse, Deformationen etc.). Beispielsweise wurde die Steifigkeit des Belages oberhalb derer Risse entstehen festgelegt. Diese kritischen Werte sind unabhängig von der Temperatur eines Strassenbelages.

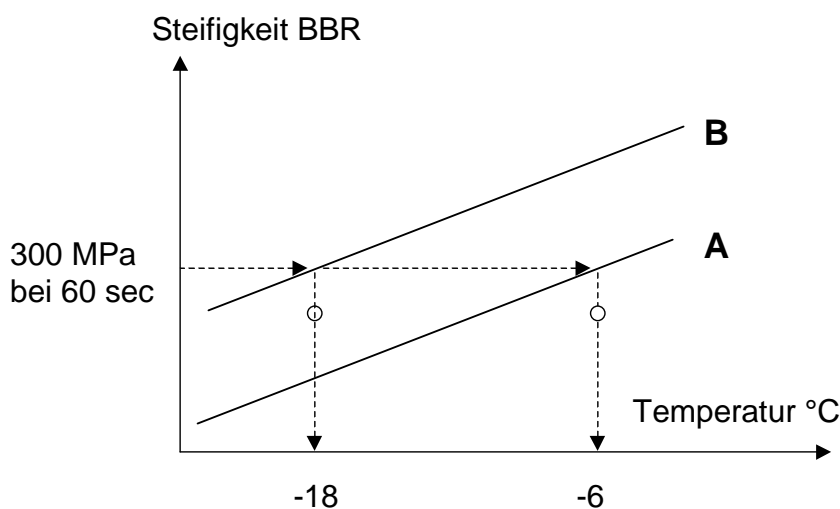
Konsequenterweise wurden diese Anforderungen unabhängig von der Bitumensorte definiert. Sämtliche Bitumen müssen die gleichen Anforderungen erfüllen, was ändert ist die Prüftemperatur bei welcher die entsprechenden Anforderungen erreicht werden soll. Die Wahl des Bindemittels erfolgt derart, dass die festgelegten Anforderungen bei den auf dem Objekt zu erwartenden Temperaturen erfüllt werden. Die Kenntnisse der klimatischen Verhältnisse auf dem Objekt spielen dabei eine zentrale Rolle.

Abbildung 1: Vergleich der bisherigen Klassifizierung von Bitumen mit der SHRP-Klassifizierung

bisher:

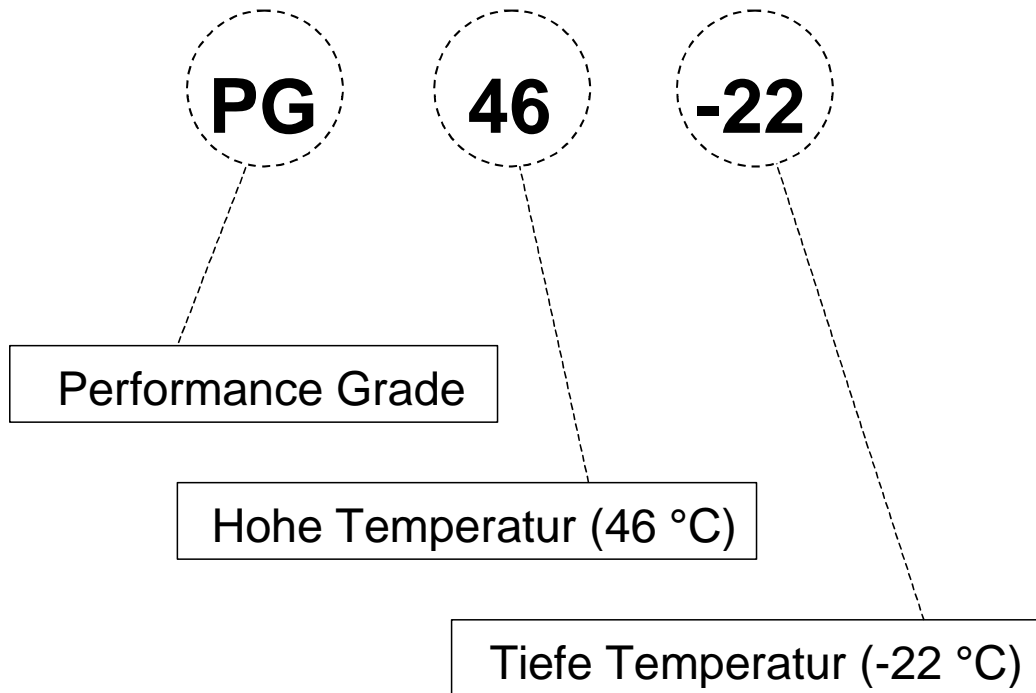


SHRP:



Da sowohl für das Kälte- wie auch für das Wärmeverhalten eine Temperatur in ähnlicher Art und Weise bestimmt wird, ergibt sich für die Definition einer Bitumensorte ein Wertepaar aus unterer und oberer Gebrauchstemperatur (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Bezeichnung der SHRP-Bitumensorten



Die oberen und unteren Gebrauchstemperaturen wurden in Klassen zu 6 °C -beginnend bei +4°C für die oberen und bei -4°C für die tieferen Temperaturen- eingeteilt; es ergeben sich folgende Temperaturen:

Für das Wärmeverhalten (high temperature HT):

< 40 < 46 < 52 < 58

Für das Kälteverhalten (low temperature LT):

> - 10 > -16 > -22 > -28 > -34

4. Klimadaten

4.1 Methode

Im Rahmen des SHRP Forschungsprojekts wurden die notwendigen Parameter zur Klassifikation bestimmt. Die vorgestellte Methode hält sich grundsätzlich an das Vorgehen dieser Studie. In einzelnen Punkten mussten allerdings auf Grund des anderen Klimas in der Schweiz neue Wege eingeschlagen werden.

Zur Klassifikation der Bindemittel sind folgende 4 klimatische Informationen erforderlich:

- Durchschnitt der Tagesmaxima der Belagstemperatur der heissesten 7-Tagesperiode in einer Tiefe von 2 cm (in der Folge als Maximumtemperatur oder $T_{s_{max, 50\%}}$ bezeichnet).
- 20-jähriger Höchstwert der Tagesmaxima der Belagstemperatur der heissesten 7-Tagesperiode in einer Tiefe von 2 cm ($T_{s_{max, 95\%}}$, 95 % Quantil).
- Tiefste Bodentemperatur eines durchschnittlichen Jahres (in der Folge als Minimumtemperatur oder $T_{s_{min, 50\%}}$ bezeichnet).
- 20-jähriger Tiefstwert der Bodentemperatur ($T_{s_{min, 95\%}}$, 95 % Quantil).

Die 4 Temperaturen werden in 6°C Schritten klassiert und so die Bitumenklassen definiert. Die Minimumtemperaturen werden als Low Temperature (LT) und die Maximumtemperaturen als High Temperature (HT) bezeichnet. Die durchschnittlichen Werte werden LT/HT50 (50 % Quantil) und die extremen Werte LT/HT95 (95% Quantil) benannt.

4.1.1 Konzept

Da die gesuchten Temperaturen nur an einzelnen Standorten in der Schweiz über längere Zeit gemessen und gespeichert wurden und somit nicht zur Verfügung stehen, müssen die 4 benötigten Parameter berechnet werden. Das Konzept der Berechnung ist in Abbildung 1 dargestellt.

Als Ausgangspunkt dienen die Lufttemperatur von 10 Stationen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) von den 10 Jahren 1987 - 96. An diesen 10 Standorten werden die 4 benötigten Temperaturwerte statt für 2 cm im Boden für 2 m über Grund berechnet, da bei diesen Stationen keine Temperaturen von Strassenbelägen gemessen wurden.

Von weiteren 21 Stationen der SMA liegen tabellierte Minimumtemperaturen der Jahre 1931 – 60 oder 1961 – 90 auf 2 m über Grund vor. Infolge der langfristigen klimatologischen Veränderungen sind Klimadaten aus unterschiedlichen Zeiträumen nicht direkt vergleichbar. Daher müssen die tabellierten Minimumtemperaturen an das Niveau der 10 Jahre 1987 – 96 angepasst werden, so dass an 31 Stationen die durchschnittlichen Minimumtemperaturen pro Jahr auf 2 m über Grund vorhanden sind.

Die Bestimmung der Maximumtemperaturen bietet grössere Schwierigkeiten. Da der Durchschnitt der Tagesmaxima der Lufttemperatur der heissesten 7-Tagesperiode an den Meteostationen standardmässig nicht berechnet wurde und somit keine Daten der vergangenen Jahre vorliegen, müssen diese Werte (für eine gewisse Anzahl Standorte) neu berechnet werden.

Die Berechnung geschieht mit dem Programm METEONORM [11,12], mit dem Stundenwerte der Luft- und Bodentemperatur stochastisch generiert werden. Für 64 Standorte werden 3 unterschiedliche Jahre generiert. An diesen werden dann die 4 benötigten Parameter für 2 cm im Boden und 2 m über Grund berechnet.

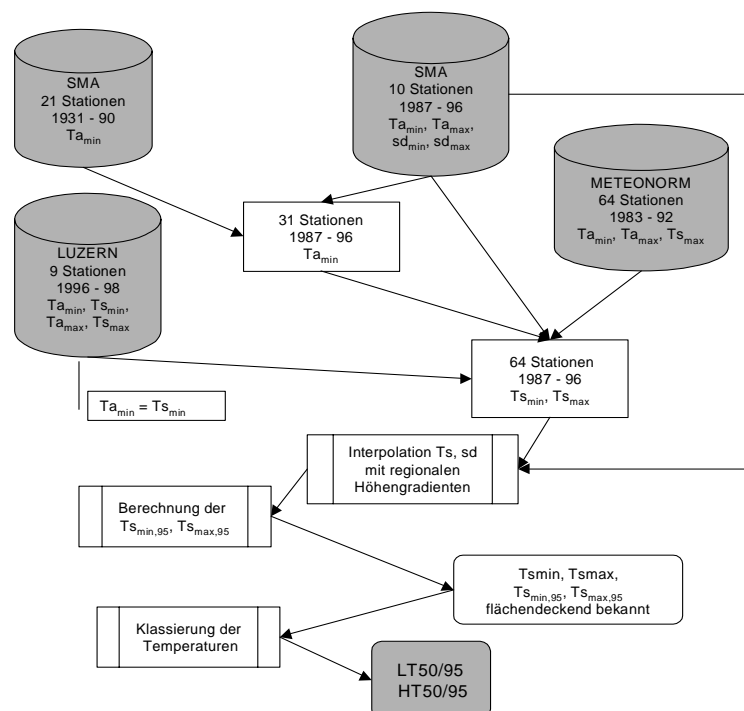
Die generierten Minimumtemperaturen auf 2 m über Grund werden an das Niveau der 31 Stationen mit gemessenen Minimumtemperaturen angepasst. Messungen an 9 Stationen an Autobahnen zeigen, dass die dort erfassten Minimumtemperaturen 2 cm im Boden den korrigierten Minimumtemperaturen auf 2 m über Grund gleichgesetzt werden können.

Die generierten Maximumtemperaturen auf 2 m über Grund werden an das Niveau der 10 Stationen mit vorliegenden Stundenwerten angepasst. Die Anpassungsgleichung auf 2 m über Grund wird auch auf die Maximumtemperaturen 2 cm im Boden angewendet. Nach diesem Schritt liegen an 64 Standorten die durchschnittlichen Minimum- und Maximumtemperaturen vor.

Als nächster Schritt werden mit einem Interpolationsmodell für die Minimum- und Maximumtemperatur und die Standardabweichung die 4 benötigten Parameter flächendeckend berechnet.

Die 20-jährigen Extremwerte werden mit Hilfe durchschnittlichen Minimum- und Maximumtemperaturen und der entsprechenden Standardabweichung berechnet, indem eine Gauss'sche Verteilung angenommen wird.

Abbildung 3: Konzept der Berechnung der Bitumenklassen LT50/95, HT50/95.



4.1.2 Berechnung der Ausgangsdaten der Lufttemperatur an 10 Stationen

Der Ausgangspunkt zur Berechnung der statistischen Daten bilden 10 Meteostationen (Automatisches Netz; ANETZ) der SMA von denen Stundenwerte der Lufttemperatur der **10 Jahre 1987 – 96** vorliegen (Tab. 1). Da an den ANETZ-Stationen keine Belagstemperaturen gemessen wurden, werden in einem ersten Schritt die minimalen und maximalen Werte der Lufttemperatur auf 2 m über Grund (Normhöhe bei Meteorologischen Messungen) bestimmt. An diesen Stationen werden die folgenden vier Ausgangsgrössen berechnet:

- Durchschnitt der Tagesmaxima der **Lufttemperatur** (T_a) der heissesten 7-Tagesperiode (in der Folge als „Maximumtemperatur auf 2 m“ oder $T_{a_{max}}$ bezeichnet). Dazu wird zuerst die heisseste 7-Tagesperiode pro Jahr bestimmt und innerhalb dieser der Durchschnitt der 7 Tagesmaxima berechnet. Der 10-jährige Durchschnitt der durchschnittlichen Tagesmaxima entspricht der Maximumtemperatur auf 2 m Höhe.
- Standardabweichung der Maximumtemperaturen: Standardabweichung der 10 jährlichen $T_{a_{max}}$ Werte (Standardabweichung der 10 jährlichen Durchschnitte der Tagesmaxima der Lufttemperatur der heissesten 7-Tagesperiode).
- Durchschnitt der jährlichen Tiefstwerte der Lufttemperatur (in der Folge als Minimumtemperatur oder $T_{a_{min}}$ bezeichnet).
- Standardabweichung der Minimumtemperaturen. Standardabweichung der jährlichen Minima der Lufttemperatur (T_a).

Tabelle 1: 56 in der Untersuchung verwendete ANETZ-Stationen. Die 10 Stationen an denen gemessene Stundenwerte ausgewertet werden, sind fett hervorgehoben. In der Spalte Messdaten sind die verwendeten Jahre angegeben (Stundenwerte 1987 – 96, Temp.-Minima: 1961 - 90, 1901 - 60).

SMA Nr.	Station	Lage	Geogr. Koordinaten		Landeskoordinaten		Höhe [m]	Messdaten [Jahre]
			X [°;']	Y [°;']	X [km]	Y [km]		
1	La Dôle	Frei	46°26'	-6°06'	497.050	142.380	1670	
2	Payerne	Frei	46°49'	-6°57'	562.150	184.855	490	87-96
4	Wynau	Mulde	47°15'	-7°47'	626.400	233.860	422	
6	Vaduz	Tal	47°08'	-9°31'	757.700	221.700	460	
7	Aigle	Tal	46°20'	-6°55'	560.120	130.630	381	
9	Fahy	Mulde	47°26'	-6°57'	562.460	252.650	596	
10	Montana	Südhang	46°19'	-7°29'	603.600	129.160	1508	
11	Zermatt	Tal	46°02'	-7°45'	624.350	097.550	1638	01-60
12	Chasseral	Frei	47°08'	-7°04'	571.290	220.320	1599	
14	Altdorf	Tal	46°52'	-8°38'	690.960	191.700	449	61-90
15	Ulrichen	Kaltluftsee	46°30'	-8°19'	666.740	150.760	1345	61-90
16	Piotta	Mulde	46°31'	-8°41'	694.930	152.500	1007	
17	Lugano	See	46°00'	-8°58'	717.880	095.870	273	87-96, 61-90
18	Samedan	Kaltluftsee	46°32'	-9°53'	787.150	156.040	1705	61-90
19	Chur-Ems	Tal	46°52'	-9°32'	759.460	193.170	555	61-90
20	Napf	Frei	47°00'	-7°56'	638.138	206.075	1406	
21	Sion	Tal	46°13'	-7°20'	592.200	118.625	482	87-96, 61-90
22	Locarno-Magadino	Tal	46°10'	-8°53'	711.170	113.540	197	61-90
23	Neuchâtel	See	47°00'	-6°57'	563.150	205.600	485	61-90
24	Stabio	Frei	45°51'	-8°56'	716.040	077.970	353	
25	Interlaken	Tal	46°40'	-7°52'	633.070	169.120	580	61-90
26	Disentis	Südhang	46°42'	-8°51'	708.200	173.800	1190	
27	Hinterrhein	Mulde	46°31'	-9°11'	733.900	153.980	1611	
28	Davos	Mulde	46°49'	-9°51'	783.580	187.480	1590	87-96, 61-90
29	St.Gallen	Frei	47°26'	-9°24'	747.940	254.600	779	87-96, 61-90
30	Glarus	Tal	47°02'	-9°04'	723.750	210.580	515	61-90
31	Genève-Cointrin	Frei	46°15'	-6°08'	498.580	122.320	420	61-90
32	Zürich-Kloten	Frei	47°29'	-8°32'	682.280	259.220	436	
33	Gütsch	Frei	46°39'	-8°37'	690.140	167.590	2287	87-96
34	Pully	See	46°31'	-6°40'	540.820	151.500	461	01-60
35	Grand-St-Bernard	Frei	45°52'	-7°10'	579.200	079.720	2472	61-90
36	Adelboden	WE-Hang	46°30'	-7°34'	609.400	148.975	1320	87-96, 61-90
37	Visp	Mulde	46°18'	-7°51'	631.150	128.020	640	
38	La Chaux-de-Fonds	Mulde	47°05'	-6°48'	551.290	215.150	1018	87-96, 61-90
39	Rünenberg	Frei	47°26'	-7°53'	633.250	253.840	610	
40	Buchs-Suhr	Frei	47°23'	-8°05'	648.400	248.380	387	61-90
41	Luzern	Frei	47°02'	-8°18'	665.520	209.860	456	87-96, 61-90
42	Engelberg	Mulde	46°49'	-8°25'	674.150	186.060	1035	01-60
43	Schaffhausen	Frei	47°41'	-8°37'	688.700	282.800	437	61-90
44	Zürich-SMA	Frei	47°23'	-8°34'	685.125	248.090	556	61-90
48	Basel-Binningen	Frei	47°33'	-7°35'	610.850	265.620	316	61-90
49	Robbia	Mulde	46°21'	-10°04'	801.850	136.180	1078	61-90
50	Scuol	Mulde	46°48'	-10°17'	817.130	186.400	1298	61-90
51	Changins	Frei	46°24'	-6°14'	507.280	139.170	430	
52	La Frétaz	Frei	46°50'	-6°35'	534.230	188.080	1202	
53	Bern-Liebefeld	Mulde	46°56'	-7°25'	598.610	197.470	565	61-90
54	Güttingen	Frei	47°36'	-9°17'	738.430	273.950	440	
56	Wädenswil	Frei	47°13'	-8°41'	693.770	230.780	463	
57	Tänikon	Frei	47°29'	-8°54'	710.550	259.820	536	
59	Locarno-Monti	Südhang	46°10'	-8°47'	704.160	114.350	366	
62	Cimetta	Frei	46°12'	-8°48'	704.370	117.515	1672	
63	Evolène-Villaz	Südhang	46°07'	-7°31'	605.415	106.740	1825	87-96
66	Grimsel-Hospiz	Frei	46°34'	-8°20'	668.460	158.160	1980	
67	Comprovasco	Tal	46°28'	-8°56'	714.998	146.440	575	01-60
68	Lägern	Frei	47°29'	-8°24'	672.250	259.460	868	
70	Plaffeien	Frei	46°45'	-7°16'	586.850	177.400	1042	

4.1.3 Generierung der Luft- und Bodentemperaturen an 64 Stationen

Als zweiter Schritt wird an 56 ANETZ-Stationen (Tab. 1) und 8 weiteren Standorten (Tab. 2) mit METEONORM [11,12] (siehe nächstes Unterkapitel) 3 durchschnittliche Jahre berechnet (mit unterschiedlichen Zufallszahlen bei der stochastischen Generierung).

Die Verwendung von generierten Daten hat zum Vorteil, dass für beliebige Standorte in und um die Schweiz Berechnungen durchgeführt werden können, um die flächendeckende Bestimmung der Minimum- und Maximumtemperaturen zu verbessern. Es zeigte sich zudem, dass mit 3 generierten Jahren die mittleren Minima und Maxima gut berechnet werden können und weitere Generierungen keinen Informationsgewinn bringen. Diese Berechnungen basieren auf den mittleren Monatswerte der Jahre 1983 – 92.

Tabelle 2: In der Untersuchung verwendete Stationen mit generierten Daten:

Nr.	Station	Lage	Geogr. Koordinaten		Höhe [m]
			Breite [°,']	Länge [°,']	
1	Milano	Frei	45°26'	-9°17'	103
2	Torino	Frei	45°11'	-7°39'	282
3	San Salvatore	Frei	45°59'	-8°57'	912
4	Saanen	Mulde	46°29'	-7°16'	1011
5	Col du Pillon	Frei	46°21'	-7°12'	1546
6	Thusis	Mulde	46°42'	-9°26'	723
7	Julierpass	Mulde	46°28'	-9°44'	2284
8	Semsaales	Mulde	46°34'	-6°55'	837

METEONORM

METEONORM [11,12] ist eine weltweite meteorologische Datenbank. Diese wurde im Auftrag des Bundesamt für Energie (BFE) in den Jahren 1992-1997 erstellt. In erster Linie dienen die Daten zur Verwendung in Dimensionierungsprogrammen von Solaranlagen und der Solararchitektur.

Von ca. 900 Stationen in der Welt sind mittlere Monatswerte der Temperatur und Globalstrahlung gespeichert (dazu noch weitere Meteoparameter wie Windgeschwindigkeit und Feuchtigkeit). Die Werte in der Schweiz entsprechen den Mittelwerten der Jahre 1983 – 92. Die Strahlungsdaten werden der weltweiten Datenbank GEBA [13] entnommen, die am Geographischen Institut der ETH Zürich erarbeitet wurde. Die Monatswerte können mit Interpolationsalgorithmen für praktisch alle Punkte der Erde flächendeckend berechnet werden.

Ausgehend von den Monatswerten werden die Stundenwerte stochastisch generiert. Dazu werden Modelle von Aguiar und Collares-Pereira [14, 15] verwendet. Die Strahlungsbilanz wird mit Modellen der EMPA [16] berechnet.

An den 64 Standorten werden die Maximum- und Minimumtemperaturen der Lufttemperatur (auf 2 m) berechnet. Zusätzlich werden die Belagtemperaturen (an der Oberfläche) mit folgender Formel nach einem Modell von Holtslag und van Ulden [17] berechnet:

$$T_s = T_a + R \cdot \frac{CH}{4 \cdot \sigma \cdot T_a^3}$$

wobei

$$CH = 0.38 \cdot \left[\frac{(1 - \alpha) \cdot S + 1}{S + 1} \right] \quad (1)$$

$$S = \exp[0.055 \cdot (T_a - 279)]$$

wobei

T _a	:	Lufttemperatur auf 2 m [°K]
T _s	:	Bodentemperatur [°K]
σ	:	Stefan-Boltzmann Konstante (5.67·10 ⁻⁸).
R	:	Strahlungsbilanz

α ist abhängig von der Feuchtigkeit; für trockene Verhältnisse wird α = 0.5 angenommen. Die Strahlungsbilanz R wird mittels Globalstrahlung, Lufttemperatur, Taupunkttemperatur, Bewölkungsgrad berechnet und berücksichtigt die Graustufe (Helligkeit) der Oberfläche.

Von der Bodentemperatur (an der Oberfläche) wird der Durchschnitt der Tagesmaxima (T_{s'}_{max}) berechnet. Diese werden mit den Formeln von SHRP [24] auf die Temperaturen in 2 cm und 7 cm Tiefe umgerechnet:

$$\begin{aligned} T_d &= (T_{s'_{\max}} + 17.78) \cdot (1 - 0.02480 \cdot d + 0.001085 \cdot d^2 - 0.0000244 \cdot d^3) - 17.78 \\ T_{2cm} &= T_{s'_{\max}} = 0.9545 \cdot T_{s'_{\max}} - 0.81 \\ T_{7cm} &= 0.8712 \cdot T_{s'_{\max}} - 2.29 \end{aligned} \quad (2)$$

wobei d die Tiefe im Belag in cm ist. Die Temperaturen T_{s'}_{max}, T_d, T_{2cm} und T_{7cm} werden in °C angegeben.

4.1.4 Korrektur der generierten Daten

Im dritten Schritt werden nun die Minimum- und Maximumtemperaturen der generierten Daten mit den Werten der gemessenen Temperaturen verglichen und – wenn nötig - korrigiert.

Neben den Minimum- und Maximumtemperaturen auf 2 m Höhe von 10 Stationen mit den Mittelwerten von 1987 – 96, dienen dazu die durchschnittlichen Minima der Jahre 1961 – 90 von 23 Messstationen und der Jahre 1901 – 60 von weiteren 4 Messstationen der SMA [18,19]. Dabei sind nur die Minima von Interesse, da die mittleren 7-Tagesmaxima nicht tabelliert sind. Die Minima müssen allerdings zuerst an die heutigen klimatischen Verhältnisse angepasst werden. An den 7 Stationen, wo sowohl Daten der Jahre 1961 – 90 und 1987 – 96 vorliegen, beträgt der Unterschied durchschnittlich -0.6 °C (die Periode 1987 - 96 war kälter !). An den 6 Stationen, wo sowohl Daten der Jahre 1901 – 60 und 1987 – 96 vorliegen, beträgt die Erwärmung durchschnittlich 1.3 °C .

Dieser Betrag wird bei allen Stationen (ausser an den Stationen mit Messdaten der Jahre 1987 – 96) addiert. Somit liegen an 31 Stationen gemessene oder zumindest angepasste gemessene Werte der Minimumtemperaturen auf 2 m sowie an 10 Stationen gemessene Maximumtemperaturen auf 2 m vor.

Die Abweichung der generierten Maximumtemperaturen von den gemessenen Temperaturen waren klein (mittlerer Fehler bei $+0.9\text{ °C}$) und können mit einer linearen Regression sehr gut korrigiert werden ($r^2 = 0.97$):

$$Ta_{\text{max,corr}} = 0.9 + 0.995 \cdot Ta_{\text{max,gen}} \quad (3)$$

Mit dieser Korrektur können für die 64 generierten Stationen korrigierte Maximumtemperaturen auf 2 m berechnet werden. Die Stationen, an denen gemessene Werte vorliegen, werden nicht korrigiert. Der Korrekturbetrag, der an allen Stationen unter 1 °C betrug, wird zu den Maximumtemperaturen am Boden addiert, um so korrigierte Bodentemperaturen zu erhalten.

Bei den Minimumtemperaturen zeigte sich, dass die Differenzen zwischen gemessenen und generierten Werten regional stark unterschiedlich waren.

Die Korrektur der generierten Minimumtemperaturen wird deshalb mit regionalen Regressionsgleichungen (abhängig von der Meereshöhe) durchgeführt (Tab. 3).

$$\Delta Ta = \text{Basis} + \text{Gradient} * h \quad (4)$$

h : Höhe über Meer in km

Vor allem in der West- und Südschweiz werden zu tiefe Temperaturen berechnet. Oberhalb 1000 m werden keine Korrekturen vorgenommen.

Für die Regionen 2, 5 und 8 ergibt sich ein Gradient [$^{\circ}\text{C}/\text{km}$]. Im Mittelland beträgt der Korrekturwert bis auf eine Höhe von 1'000 m konstant $1,7^{\circ}\text{C}$; in Graubünden ist keine Korrektur nötig.

Tabelle 3: Korrekturen der generierten Minimumtemperaturen. Regionale Gradienten der Abweichungen in [$^{\circ}\text{C}$].

Nr.	Region	Höhenbereich	Basis	Gradient	Parameter
1 3 4 6	Jura Westliches Mittelland Östliches Mittelland/Voralpen Wallis	200 – 1000 m	1.7	-	-
2 5	Genfersee Nördliche Voralpen	300 – 1000 m	6.8	-6.0	Höhe
7	Graubünden	500 – 1000 m	0.0	-	-
8	Alpensüdseite (Norditalien)	200 – 1000 m	14.4	0.9	Temperatur

4.1.5 Messungen im Kanton Luzern

Vom Autobahnmessnetz des Kantons Luzern werden die Daten von 9 Stationen verwendet (Tab. 4). Von diesen Meteostationen (Typ Vaisala) liegen 15-Minutenwerte der Jahre 1996 – 98 vor. Folgende Parameter werden ausgewertet: Lufttemperatur, Bodentemperatur (0 cm), Bodentemperatur (-6 cm), Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit. Da diese Meteostationen zum Zweck des raschen Erkennens von Strassenvereisungen platziert wurden, sind die Standorte für klimatologische Zwecke nicht optimal. Zudem weisen die Messreihen grosse Lücken auf, was dazu führte, dass für einzelne Stationen nur die Daten eines Sommers für die Bestimmung der Maximumtemperaturen verwendet werden können. Trotzdem dienen die Daten dazu, die Resultate der Modelle mit gemessenen Daten zu vergleichen und die Bodentemperaturmodelle zu testen und auszuwählen. In der Tabelle 4 wurden die Minimum- und Maximumtemperaturen mit der Gleichung (2) berechnet. In der Kolonne "Jahre" wird die Messperiode angegeben, mit welcher die Berechnung der Maximumtemperaturen erfolgte.

**Tabelle 4: In der Untersuchung verwendete Stationen des Autobahnmessnetzes im Kanton Luzern.
 Daten der Messperiode Januar 1996 bis August 1998.**

Nr	Station	Lage	Geogr. Koordinaten		Jahre Ta _{max}	Höhe [m]	Ta _{max} [°C]	Ts _{max} [°C]	Ta _{min} [°C]	Ts _{min} [°C]
			X [°,']	Y [°,']						
1	Stängelmatten	Frei	47°13'	-7°58'	96	470	29.2	47.9	-9.9	-11.1
2	Knutwilerhöhe	Frei*	47°11'	-8°04'	96	560	28.0	45.5	-10.0	-9.6
3	Trichterbrücke	Frei	47°10'	-8°08'	96	510	27.9	46.3	-9.9	-10.9
4	Truttigen	Frei	47°07'	-8°13'	96	570	28.2	46.4	-9.7	-8.8
5	Rotbachbrücke	Frei	47°05'	-8°15'	96	520	28.8	48.2	-10.3	-10.5
6	Grosshofbrücke	Stadt	47°02'	-8°18'	96,98	460	30.1	48.3	-8.4	-8.3
7	Haldiwald	See*	47°00'	-8°19'	96	440	27.1	45.0	-7.8	-7.3
8	Bermudadreieck	Frei	47°04'	-8°18'	96,98	435	30.5	51.9	-8.9	-8.4
9	Reussbrücke	Frei	47°06'	-8°21'	96,98	420	30.7	47.0	-9.0	-8.4

* Zusätzlich E-Hang

Ta : Lufttemperatur

Ts : Bodentemperatur

Anhand des Vergleichs der Station Grosshofbrücke mit der ANETZ-Station Luzern, die nur 300 m auseinander liegen, können die mittleren Temperaturdifferenzen bezüglich der Referenzperiode 1987 - 96 bestimmt werden. Die Minimumtemperaturen der Station Grosshofbrücke liegen etwa 1°C höher als die der Referenzperiode. Die Maximumtemperaturen an den Stationen 1 – 5 und 7 (Messperiode 1996) liegen rund 1°C höher, diejenigen an den Stationen 6, 8 – 9 (Messperiode 1996 und 1998) liegen rund 2°C über der Referenzperiode.

Die Unterschiede zwischen den Stationen sind recht hoch und können nicht alle durch die regionale Lage erklärt werden. Die Stationen 6 – 9 weisen leicht höhere Minimumtemperaturen auf als die Stationen 1 – 5. Diese Unterschiede werden auch bei der Regionalisierung berücksichtigt, indem die Grenze zwischen Region 4 (östliches Mittelland/Voralpen) und 5 (nördliche Voralpen) zwischen der Station 5 und 8 verläuft (Tab. 6). Die Maximumtemperatur von 51.9 °C an der Station Bermudadreieck können nur durch lokale Effekte wie z.B. Stützmauern erklärt werden.

Eine weitergehende differenzierte Regionalisierung auf Grund der 9 Stationen ist sehr schwierig, da die Temperaturen von vielen, sich überlagernden Faktoren abhängen. Generell kann gesagt werden, dass die Messungen auf Brücken über kleinere Bäche oder Transportwege (z.B. Standort Nr. 4) eher grössere Schwankungen aufweisen (Minimum -0.5°C, Maximum +1.5°C). Bei Brücken muss allerdings noch auf das Medium unterhalb der Brücke geachtet werden: So werden über der Reuss (Station Nr. 9) eher gedämpfte Schwankungen gemessen. An den Osthängen liegenden, schattigen Standorten Nr. 2 und 7 werden eher niedrigere Maximumtemperaturen gemessen. Um neue Klassen zu bilden (siehe Kapitel 3.2.8), ist die Datenlage aber zu unsicher.

4.1.6 Minimumtemperaturen an der Strassenoberfläche

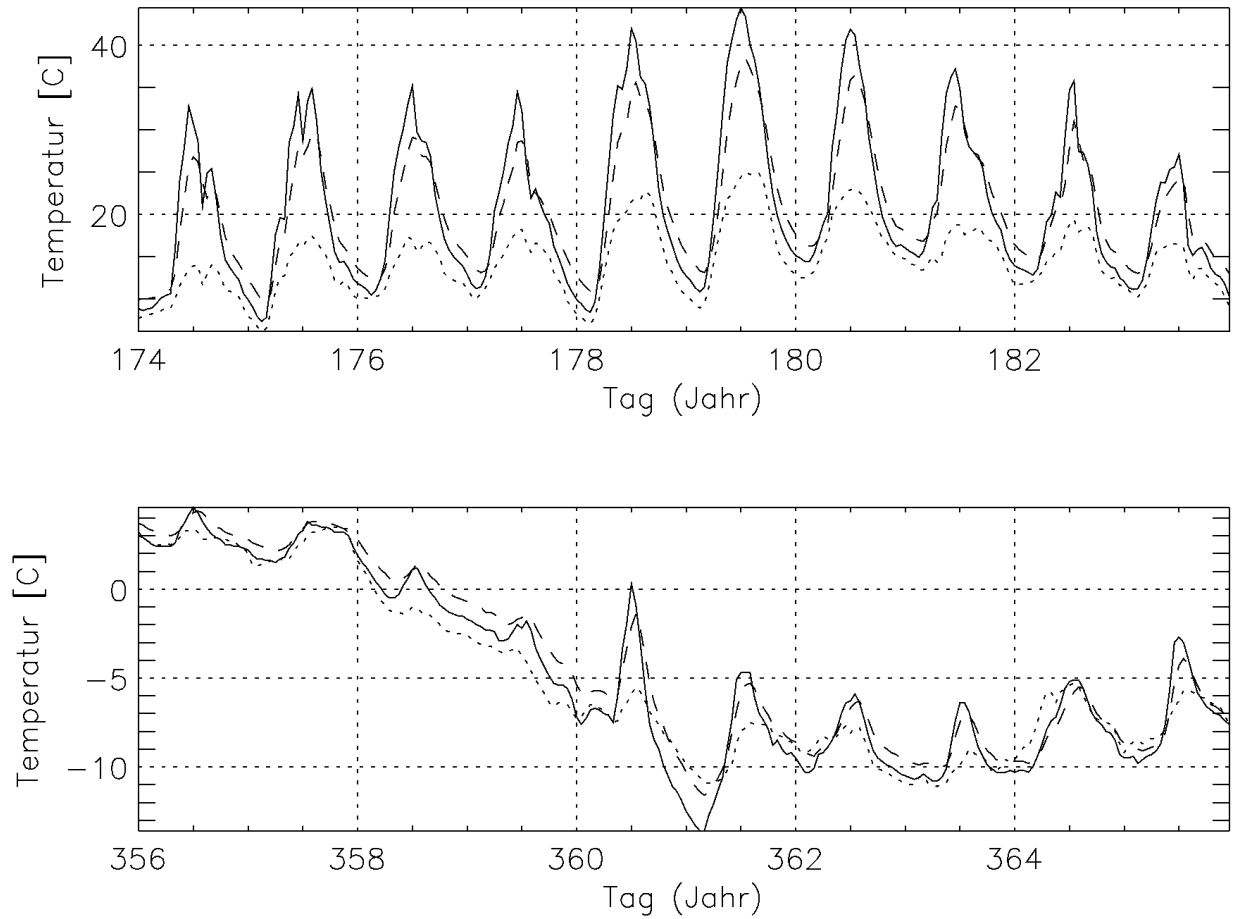
In Abbildung 4 sind die Temperaturverläufe auf 2 m über Grund, an der Oberfläche und 6 cm im Belag dargestellt. Die Oberflächentemperatur weist die grössten Schwankungen auf. Im Sommer ist die Oberflächentemperatur fast immer höher. Im Winter kann sie in klaren Nächten unter die 2 m Temperatur fallen (allerdings nicht bei allen Stationen).

Im Schnitt sind die Minimumtemperaturen auf 2 m und an der Oberfläche gleich hoch. (Abb. 5). Aus diesem Grund wird auf eine Korrektur, wie dies im SHRP in den USA mit Gleichung 4 geschah, verzichtet. Die minimale Bodentemperatur wird gleich der minimalen Lufttemperatur gesetzt.

$$T_{s_{\min,x\%}} = -1.56 + 0.72 \cdot T_{a_{\min}} - 0.004 \cdot \varphi^2 + 6.26 \cdot \log_{10}(H + 2.5) - z \cdot \sqrt{4.4 + 0.52 \cdot sd_{\min}^2} \quad (5)$$

Wobei $T_{s_{\min,x\%}}$ die Bodentemperatur für verschiedene Tiefen und Quantile (x%) bedeutet. Für x=50% ist z=0. Der letzte Teil der Gleichung ist abhängig vom Quantil und der Standardabweichung, wobei eine Gauss-Verteilung angenommen wird. Für das 50 % Quantil ist z=0 zu setzen, für das 95% Quantil (20-Jähriger Extremwert) ist z=1.77 zu setzen. φ ist die geographische Breite, H die Belagstiefe in cm. In Abb. 5. Ist die Formel für die Oberfläche (H=0) und für x=50% (z=0) verwendet worden.

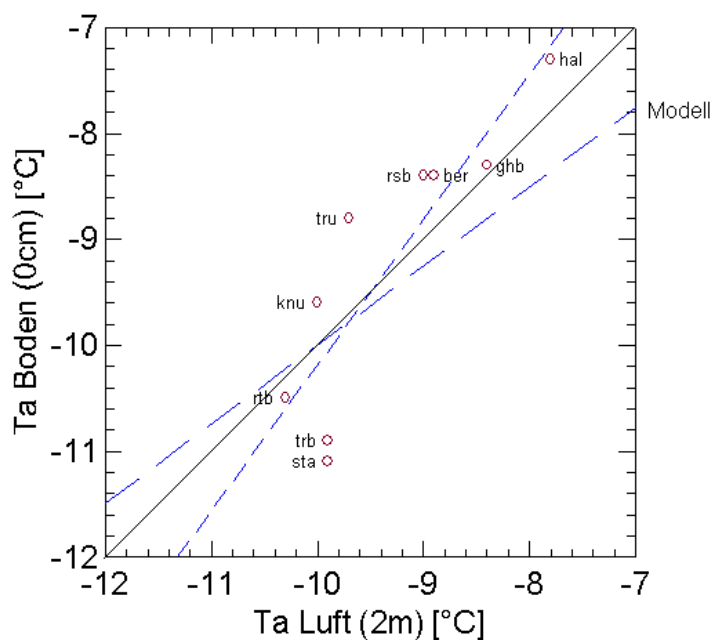
Abbildung 4: Temperaturverläufe an der Station Stängelmatten vom 23.6. – 2.7. (oben) und vom 23. - 31.12.1996 (unten).



Legende:

- Bodentemperatur (0 cm)
- Lufttemperatur (2 cm)
- Bodentemperatur in 6 cm Tiefe

Abbildung 5: Lufttemperatur (2 m) vs. Bodentemperatur an den 9 Stationen im Kanton Luzern. Im Schnitt sind die Luft- und die Bodentemperaturen gleich hoch. Die grössten Differenzen werden an den Stationen Stängelmatten (sta), Triechterbrücke (trb) und Truttigen (tru) verzeichnet.



Legende:

- — — — — lineare Regression der Messwerte
- — — — — Modell SHRP

4.1.7 Maximumtemperaturen im Boden

Für die Berechnung der Maximumtemperaturen im Boden stehen zwei Methoden zur Auswahl:

1. Verwendung der generierten Bodentemperaturdaten (METEONORM-Modell)
2. Verwendung des SHRP-Modells zur Bestimmung des Temperaturunterschieds zwischen 2 m und der Oberfläche.

Die beiden Methoden werden anhand der Luft- und Bodentemperaturdaten der Stationen Ardon und Grosshofbrücke begutachtet. Zusätzlich werden die Resultate mit den Daten der 8 weiteren Luzerner Autobahnstationen verglichen. Von den 9 Luzerner Stationen wurde die Station Grosshofbrücke ausgewählt, da diese nur 300 m von der ANETZ-Station Luzern entfernt liegt und somit gut mit dieser verglichen werden kann.

Im Rahmen der auf der N9 im Kanton Wallis realisierten Vergleichsstrecken mit PmB [20, 21, 22] wurden die Temperaturen an der Luft und im Belag gemessen.

Diese Messreihe liegt in Ardon für die Jahre 1991 und 1993 vor: das mittlere Maximum der Lufttemperatur betrug 29.9°C, was dem Mittelwert von 29.9 °C der Jahre 87 – 96 entspricht und die Maximumtemperatur 5 cm im Boden betrug 41.4 °C. Mit der Gleichung 2 erhält man damit 45.1 °C für 2 cm Tiefe. Die Daten der Autobahnmessstation Grosshofbrücke in Luzern sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

Nach dem SHRP-Modell ist der Unterschied zwischen Boden- (TS; 2 cm Tiefe) und Lufttemperatur, folgendermassen abhängig von der geographischen Breite φ :

$$T_{s_{\max}} - T_{a_{\max}} = (-0.00618 \cdot \varphi^2 + 0.2289 \cdot \varphi + 42.2) \cdot 0.9545 - 17.78 \quad (6)$$

Die Ergebnisse nach dieser Gleichung berechnet, die mit der METEONORM berechneten sowie die gemessenen Daten sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die generierten Daten näher bei den gemessenen liegen als die mit dem SHRP-Modell berechneten. Das SHRP-Modell überschätzt die Maximumtemperaturen an den beiden Standorten (Tabelle 5 und Abbildung 6).

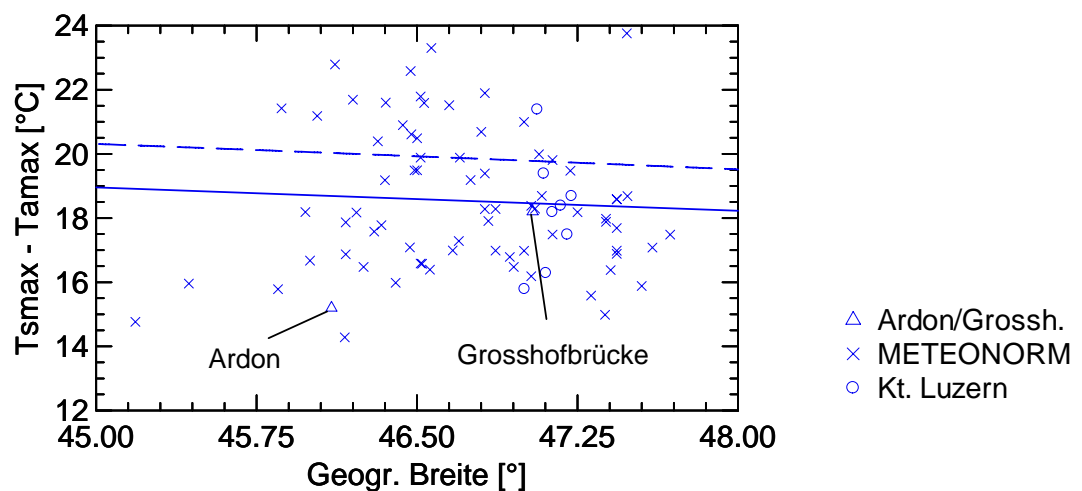
Tabelle 5: Gemessene und berechnete Maximumtemperaturen von Ardon/Sion und Grosshofbrücke/Luzern. Diff. bezeichnet die Differenz zwischen der Boden- und der Lufttemperatur.

Messjahre / Modell	87-96	2 Jahre gemessen			Generiert (Meteonorm)			SHRP (Formel (6))	
		T _{a_{max}}	T _{a_{max}}	T _{s_{max}}	Diff.	T _{a_{max}}	T _{s_{max}}	Diff.	T _{s_{max}}
Ardon/Sion	29.9	29.9	45.1	15.3	29.3	46.7	17.4	49.9	20.0
Grosshofb./Luzern	28.1	30.1	48.3	18.2	27.8	43.2	15.4	47.8	19.7
Mittel				16.8			16.4		19.9

Allein anhand von zwei Standorten die Entscheidung für ein Modell zu treffen, ist zugegebenermassen mit Unsicherheiten behaftet. Dass das nordamerikanische Modell allerdings zu grosse Differenzen berechnet, überrascht nicht, herrschen in weiten Teilen der USA und Kanadas doch viel grössere mittlere Globalstrahlungswerte und ein sonnigeres, trockeneres (kontinentaleres) Klima vor (Jahreswerte der Globalstrahlung: Chicago: 1410 kWh/m², Sion: 1309 kWh/m², Buchs-Suhr: 1025 kWh/m²) als in der Schweiz.

Da selbst für Sion, das in einer der strahlungsreichsten Gegenden der Schweiz liegt, der Temperaturunterschied zwischen Boden und Luft mittels SHRP-Modell zu gross berechnet wird, sollte unserer Meinung nach das SHRP-Modell in der Schweiz nicht verwendet werden.

Abbildung 6: Unterschied zwischen Maximumtemperaturen im Boden (Ts) und auf 2 m Höhe (Ta) in Abhängigkeit der geographischen Breite.

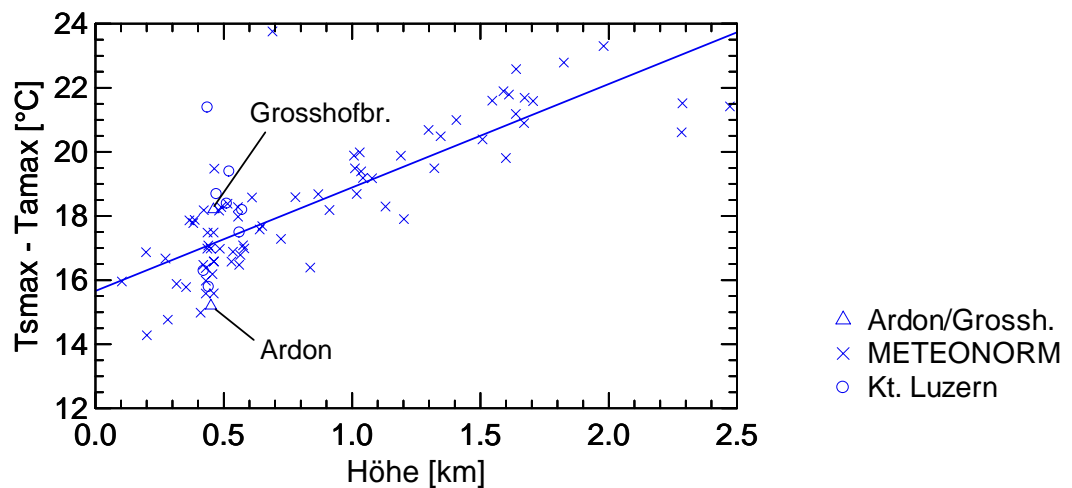


Legende:

- SHRP - Modell
- lineare Regression der mit METEONORM generierten Daten

Die Analyse des METEONORM-Modells zeigt, dass in der Schweiz der Temperaturunterschied mit der Höhe über Meer korreliert ist, was damit erklärt werden kann, dass in grösserer Höhe wegen der klareren Luft höhere maximale Strahlungswerte auftreten, die den Boden stärker aufheizen (Abb. 7). Ab 1500 m über Meer stimmen das SHRP- und das METEONORM-Modell überein.

Abbildung 7: Temperaturunterschied zwischen Boden (Ts) und Luft (Ta) in Abhängigkeit der Meereshöhe.



Die vorliegenden Messpunkte sind zu unsicher und zu wenig zahlreich, dass die generierten Daten korrigiert werden könnten. Da aber die Berechnung für die beiden Standorte Ardon und Grosshofbrücke recht gut stimmen, werden die korrigierten, generierten Bodentemperaturen verwendet. Die restlichen 8 Standorte im Kanton Luzern weisen zwar gegenüber der generierten Daten recht grosse Schwankungen auf, im Mittel stimmen diese aber ebenfalls gut überein.

Somit sind nun für 64 Punkte in und um die Schweiz die Minimum- und Maximumtemperaturen am Boden bekannt.

4.1.8 Interpolation

Bei der Temperaturinterpolation wird eine Methode verwendet, die der Temperaturinterpolationsmethode der METEONORM sehr ähnlich ist: Mit den von den lokalen Geländeeinflüssen korrigierten Stationswerten der einzelnen Regionen werden regionale Höhengradienten der Temperatur berechnet. Von diesen wird dann angenommen, dass sie, abgesehen von den wiederum zu berücksichtigenden lokalen Einflüssen, für die ganze Region gelten. Das bedeutet, dass für die gleiche Höhe innerhalb einer Region und ohne Berücksichtigung des Lokalklimas die gleiche Monatstemperatur gilt.

Die Schweiz wird in 8 Temperaturregionen unterteilt (Tab. 6). In diesen 8 Temperaturregionen lassen sich in Abhängigkeit von der Höhe über Meer mit der Formel (7) die Minimum- und Maximumtemperaturen berechnen.

$$T_s = d + h * c + l \tag{7}$$

wobei

d : Regionaler Basiswert der Temperatur auf Meereshöhe

h : Höhe über Meer [km]

c : Gradient in [°C/km]; Basis bezogen auf m.ü.M.

l : lokaler Lagekorrekturwert gemäss Tabelle 8

Tabelle 6: Regionale Basiswerte und Höhengradienten der Minimum- und Maximumtemperaturen.

Nr.	Region	Höhenbereich	Ts _{min}			Ts _{max}		
			d	c	r ² , F-Test	d	c	r ² , F-Test
1	Jura	200 – 1700 m	-8.3	-5.5	0.91, 0.003	46.9	-5.0	0.88, 0.005
2	Genfersee	300 – 1700 m	-6.4	-7.3	0.99, 0.006	46.1	-3.0	0.67, 0.000
3	Westliches Mittelland	300 – 1700 m	-6.8	-6.7	0.86, 0.008	46.1	-3.0	0.67, 0.000
4	Östliches Mittelland/Voralpen	300 – 1700 m	-8.6	-5.7	0.81, 0.000	46.1	-3.0	0.67, 0.000
5	Nördl. Voralpen	300 – 2500 m	-7.5	-5.6	0.97, 0.000	45.1	-2.4	0.81, 0.001
6	Wallis	300 – 2500 m	-8.3	-4.8	0.93, 0.000	49.1	-4.5	0.85, 0.003
7	Graubünden	300 – 2500 m	-8.2	-6.5	0.71, 0.008	47.7	-3.4	0.73, 0.000
8	Alpensüdseite	200 – 2500 m	-6.9	-5.1	0.83, 0.000	47.9	-3.8	0.80, 0.000

In den meisten Regionen liegt das Bestimmtheitsmass (r^2) der Regressionen über 0.8. Die grösste Schwierigkeit bereitet der starke Einfluss des lokalen Geländes, der vor der Berechnung herausgefiltert werden muss.

Für die Gebiete Wallis, Graubünden und Alpensüdseite zeigte sich, dass Polynome 3. Grades (8) die Höhenvariation der Maximumtemperaturen besser wiedergeben als lineare Ansätze (Tabelle 7 und Abbildung 6).

$$T_s = a \cdot h^3 + b \cdot h^2 + c \cdot h + d \quad (8)$$

wobei

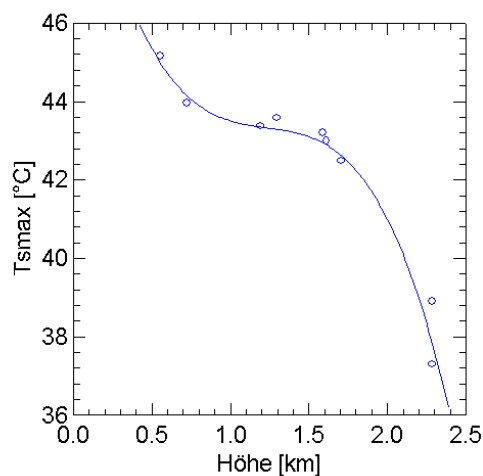
h : Meereshöhe in km

a, b, c und d Koeffizienten der Funktion

Tabelle 7: Regionale Koeffizienten für die Berechnung der Maximumtemperaturen; Polynome 3. Grades für die Regionen Wallis, Graubünden und Alpensüdseite.

Nr.	Region	Höhenbereich	Koeffizienten				r^2
			a	b	c	d	
6	Wallis	300 – 2500 m	-5.9	26.1	-37.8	60.3	0.93
7	Graubünden	300 – 2500 m	-4.2	15.5	-19.6	51.8	0.97
8	Alpensüdseite	200 – 2500 m	-4.2	15.2	-17.2	50.2	0.98

Abbildung 8: Höhenvariation der Maximumtemperaturen in Graubünden. Modell: Polynom 3. Grades.



Die Zuordnung des Lagetyps eines Standortes ist sehr heikel. Ein Grund dafür ist, dass in der Natur die Grenzen der Lagetypen fließend sind und sich mehrere Einflüsse überlagern können, im verwendeten Modell gemäss Gleichung 6 aber nur einzelne Extremlagen ausgewählt werden können.

Die Korrekturwerte (Tab. 8) bewegen sich zwischen -6.0 °C und $+1.5\text{ °C}$. Der maximale Unterschied in einem Monat beträgt 7.5 °C (extremer Kaltluftsee oder Südhang). Ein solcher Temperaturunterschied wird vertikal bei einem durchschnittlichen Gradienten von $-6,0\text{ °C/km}$ erst bei einem Höhenunterschied von 1250 Metern erreicht.

Dies macht deutlich, wie stark der lokale Einfluss sogar gegenüber dem starken Einfluss der Höhe zu gewichten ist. Demgegenüber ist der horizontale Gradient fast vernachlässigbar, was auch die relativ grossen Temperaturregionen zulässt. Feinere Lageklassierungen liessen sich mit den vorhandenen Datenmaterial nicht finden. Allerdings sind die Unterschiede z.B. zwischen Stadt und Land bereits sehr klein (0.5 °C).

Tabelle. 8: Lokale Lagekorrekturwerte in [°C]. Werte unter 0.5 °C werden auf Null gesetzt, Werte darüber auf 0.5 °C gerundet. Die Lageklassen sind in Tabelle 12 erläutert.

Lage	Minima [°C]	Maxima [°C]
Frei	0.0	0.0
Mulde	-2.5	0.0
Kaltluftsee	-6.0	1.0
See	2.0	-0.5
Stadt	0.5	0.5
Südhang	1.5	1.5
Ost-Hang	0.7	0.0
West-Hang	0.7	0.7
Wald	0.0	-6.0

Die Standardabweichung dieser Berechnung liegt bei ca. 1 °C . Die Stadt-Land Unterschiede werden mit Daten der NABEL-Stationen Duebendorf und Zürich bestimmt (Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe des BUWAL). Für West-Hänge werden die halben Werte der Südhänge eingesetzt. Für Ost-Hänge werden bei den Minima ebenfalls die halben Werte der Südhänge eingesetzt. Bei den Maxima ist der Korrekturwert 0.0 °C .

Da uns keine Messungen von Belagtemperaturen an Waldstandorten vorlagen, werden mit dem Programm METEONORM zwei Waldstandorte simuliert. Dabei werden für den Standort der ANETZ-Station Payerne 2 verschiedene Horizonte definiert, einen mit einer Nord-Süd und einen mit einer West-Ost verlaufenden Strasse. Die Horizonte werden bei der Strahlungs- und Temperaturgenerierung berücksichtigt. Die Unterschiede der Maximumtemperatur zu Berechnungen auf offenem Gelände betragen zwischen -9 °C (N-S Strasse) und -5 °C (West-Ost Strasse). Da diese Berechnungen recht unsicher sind und die Verhältnisse innerhalb eines Waldes sehr unterschiedlich sein können, wird der Korrekturbetrag auf eine Klassenbreite (6 °C) der Bitumenklassen gerundet. Es gilt zu beachten, dass diese Rechnungen für nur geschlossene Wälder gelten. Für offene Wälder gilt ein Wert zwischen dieser Lagekorrektur und 0.0 °C . Die mit dem Programm Meteonorm simulierten Temperaturunterschiede zwischen Wald und freiem Feld liegen im Rahmen von Erfahrungswerten. So berichtet Leibundgut [23] über maximale Temperaturunterschiede zwischen Wald und offenes Feld in einer Höhe von 10 cm über Boden von bis zu 6 °C im Sommer und bis zu 9.3 °C im Winter.

Die Korrekturwerte können auch für andere stark beschattete Standorte verwendet werden, die selbst im Sommer kaum von der Sonne beschienen werden.

Für Standorte, die südlich einer grossen Stützmauer liegen, können die Korrekturwerte der Lage Südhang verwendet werden.

4.1.9 Berechnung der 50% und 95% Quantile

In diesem Kapitel werden die 50% und die 95% Quantile der Temperaturen berechnet. Das 50% Quantil wird dem Mittelwert gleichgesetzt (stimmt bei den Temperaturen bis auf wenige Zehntel genau). Im Gegensatz zur nordamerikanischen Studie werden hier nicht das 98% Quantil verwendet sondern das 95% Quantil. Der 98%-Wert würde statistisch nur noch alle 50 Jahre auftreten und sehr extremen Werten entsprechen. Deshalb wird hier der 95% Wert berechnet, der statistisch gesehen alle 20 Jahre auftreten würde oder dass in 95% der Jahre die Maximumtemperatur nicht überschritten wird, bzw. die Minimumtemperatur nicht unterschritten wird. Bei den Minimum- und Maximumtemperaturen wird angenommen, dass die Verteilungen einer Normalverteilung entsprechen.

Das 95% Quantil wird folgendermassen errechnet:

$$\begin{aligned} Ts_{\min,95\%} &= Ts_{\min} - 1.77 \cdot sd_{\min} \\ Ts_{\max,95\%} &= Ts_{\max} + 1.77 \cdot sd_{\max} \end{aligned} \quad (9)$$

Die Standardabweichung (sd) wird an den 10 Stationen mit gemessenen Stundenwerten der 10 Jahre berechnet. An diese Daten kann ein Modell angepasst werden, das abhängig von der Höhe und der regionalen und lokalen Lage ist:

Minimumtemperatur (Standardabweichung des Fehlers: 0.3°C) (Höhe h in [km])

Allgemein :

$$sd_{\min} = 3.3 + 0.52 \cdot h \quad (10)$$

Für Wallis, Graubünden und Tessin :

$$sd_{\min} = 1.4 + 1.31 \cdot h$$

Maximumtemperatur (Standardabweichung des Fehlers: 0.1°C):

Allgemein :

$$sd_{\max} = 0.8 + 0.23 \cdot h \quad (11)$$

Für Alpentäler :

$$sd_{\max} = 0.5 + 0.24 \cdot h$$

4.1.10 Berechnung der Bitumenklassen (Performance Grade)

Die berechneten 50% und 95% Quantile der Minimum- und Maximumtemperaturen werden in 6er Klassen zusammengefasst. Die Klassen der negativen Temperaturen beginnen bei -4, die der positiven Temperaturen bei +4 °C. Die Temperaturen werden jeweils der betragsmässig nächst höheren Klasse zugeordnet nachdem die Resultate auf ganze Zahlen °C gerundet werden. Das 50% Quantil der Minimumtemperatur wird als LT50 bezeichnet (low temperature), das 95% Quantil als LT95; bei der Maximumtemperaturen wird analog das 50 % Quantil als HT50 (high temperature) und das 95% Quantil als HT95 bezeichnet.

$$\begin{aligned}LT95 &= \left[\text{Runden} \left(T_{s_{\min,95\%}} - 1 \right) / 6 \right] * 6 - 4 \\HT95 &= \left[\text{Runden} \left(T_{s_{\max,95\%}} + 1 \right) / 6 \right] * 6 + 4\end{aligned}\tag{12}$$

Runden: auf ganze Zahlen gerundet.
Die 50% Quantile werden analog dazu gerechnet.

Im Abschnitt 6.2 ist die Berechnung der Minimum- und Maximumtemperatur anhand eines Anwendungsbeispiels erklärt.

In den Tabellen 9 und 10 wurden die Temperaturen LT und HAT für die 50- und 95%-ige Wahrscheinlichkeit an 56 ANETZ-Stationen berechnet. Daraus wurden die Binder Grades abgeleitet.

5. Ergebnisse

Die Resultate der berechneten Temperaturen liegen als Tabellen 9 und 10 und als Karten (Abbildungen 9 bis 12) vor. Die Karten wurden mit dem geografischen Informationssystem ARC/INFO erarbeitet. Die Lageklassifikation (Mulden, Südhänge, West-Ost-Hänge, Seen, Städte und Kaltluftseen) wurden für die Karten mit Hilfe von Geländedaten (Höhenmodell 250 m Raster) automatisch bestimmt.

Die Unterschiede der „binder grades“ sind auf den ersten Blick recht klein. An den meisten Orten treten 50% Werte von 46/–16 auf. Bei den 95% Quantile reichen die Klassen der Tiefsttemperaturen (LT) von –40 bis –10 und diejenigen der Höchsttemperaturen (HT) von 40 bis 52. Im Vergleich zu den nordamerikanischen Daten entspricht das immerhin einer Spanne von Neu England bis Florida. Die Unterschiede zwischen den Tiefst- und den Höchsttemperaturen sind allerdings bis auf wenige Ausnahmen (Samedan) viel kleiner als in den USA, was nicht erstaunt, herrscht doch in weiten Teilen der USA und Kanadas ein kontinentales Klima vor und in der Schweiz ein ozeanisches.

Die nordöstlichen Gebiete sind recht kalt. Deutlich ist die Grenze erkennbar, wo die Kaltluft aus dem Osten gut hingelangt und wo diese nicht gut eindringen kann. Diese Grenze läuft entlang des Alpennordhangs, wobei bereits in der Innerschweiz rund 2 °C wärmere Minimumtemperaturen verzeichnet werden als in der Ostschweiz auf vergleichbarer Höhe. Die höchsten Minimumtemperaturen werden in der Alpensüdseite und im Genferseebecken gemessen. Die höchsten Temperaturen werden wiederum in der Alpensüdseite, aber auch im Wallis verzeichnet. Die grössten Unterschiede treten im Oberengadin (Samedan) auf, wo 73 °C zwischen der Maximum- und der Minimumtemperatur liegen. Die kleinsten Unterschiede werden in Lugano mit 49 °C gemessen.

Tabelle 9: Minimum- und Maximumtemperaturen, 50% Quantile und Binder Grades an 56 ANETZ-Stationen.

Station	Höhe	Ta				50% W.				Binder	Grades
		Minima		Maxima		Temperaturen					
		Mittel	sd _{min}	Mittel	sd _{max}	Ta _{max}	Ts _{max}	Ta _{min}	Ts _{min}		
La Dôle	1670	-19	4	21	1	21	41	-19	-19	46	-22
Payerne	490	-11	4	29	1	29	46	-11	-11	46	-16
Wynau	422	-11	4	27	1	27	45	-11	-11	46	-16
Vaduz	460	-12	2	27	1	27	44	-12	-12	46	-16
Aigle	381	-9	3	28	1	28	45	-9	-9	46	-10
Fahy	596	-13	4	27	1	27	44	-13	-13	46	-16
Montana	1508	-15	3	23	1	23	43	-15	-15	46	-16
Zermatt	1638	-17	4	24	1	24	44	-17	-17	46	-22
Chasseral	1599	-17	4	20	1	20	39	-17	-17	40	-22
Altdorf	449	-10	4	28	1	28	44	-10	-10	46	-10
Ulrichen	1345	-20	3	23	1	23	43	-20	-20	46	-22
Piotta	1007	-16	3	25	1	25	44	-16	-16	46	-16
Lugano	273	-4	2	29	1	29	45	-4	-4	46	-4
Samedan	1705	-30	4	23	1	23	43	-30	-30	46	-34
Chur-Ems	555	-12	2	28	1	28	45	-12	-12	46	-16
Napf	1406	-17	4	22	1	22	42	-17	-17	46	-22
Sion	482	-10	2	30	1	30	47	-10	-10	52	-10
Locarno-Magadino	197	-10	2	31	1	31	47	-10	-10	52	-10
Neuchâtel	485	-9	4	29	1	29	45	-9	-9	46	-10
Stabio	353	-8	2	30	1	30	45	-8	-8	46	-10
Interlaken	580	-12	4	27	1	27	43	-12	-12	46	-16
Disentis	1190	-15	3	26	1	26	45	-15	-15	46	-16
Hinterrhein	1611	-20	4	22	1	22	43	-20	-20	46	-22
Davos	1590	-20	4	22	1	22	43	-20	-20	46	-22
St.Gallen	779	-13	4	25	1	25	43	-13	-13	46	-16
Glarus	515	-12	2	27	1	27	44	-12	-12	46	-16
Genève-Cointrin	420	-9	4	30	1	30	46	-9	-9	46	-10
Zürich-Kloten	436	-11	4	28	1	28	44	-11	-11	46	-16
Gütsch	2287	-20	5	17	1	17	37	-20	-20	40	-22
Pully	461	-8	4	28	1	28	44	-8	-8	46	-10
Grand-St-Bernard	2472	-19	5	16	1	16	37	-19	-19	40	-22
Adelboden	1320	-16	4	23	1	23	42	-16	-16	46	-16
Visp	640	-14	2	28	1	28	45	-14	-14	46	-16
La Chaux-de-Fonds	1018	-17	5	24	1	24	42	-17	-17	46	-22
Rünenberg	610	-12	4	27	1	27	45	-12	-12	46	-16
Buchs-Suhr	387	-12	3	28	1	28	45	-12	-12	46	-16
Luzern	456	-10	4	28	1	28	44	-10	-10	46	-10
Engelberg	1035	-15	4	24	1	24	43	-15	-15	46	-16
Schaffhausen	437	-11	4	28	1	28	45	-11	-11	46	-16
Zürich-SMA	556	-10	4	27	1	27	45	-10	-10	46	-10
Basel-Binningen	316	-10	3	29	1	29	44	-10	-10	46	-10
Robbia	1078	-15	3	26	1	26	45	-15	-15	46	-16
Scuol	1298	-18	3	24	1	24	44	-18	-18	46	-22
Changins	430	-9	4	29	1	29	44	-9	-9	46	-10
La Frétaz	1202	-15	4	23	1	23	40	-15	-15	40	-16
Bern-Liebefeld	565	-12	4	27	1	27	43	-12	-12	46	-16
Güttingen	440	-12	4	28	1	28	45	-12	-12	46	-16
Wädenswil	463	-10	4	27	1	27	46	-10	-10	46	-10
Tänikon	536	-11	4	27	1	27	44	-11	-11	46	-16
Locarno-Monti	366	-5	2	31	1	31	48	-5	-5	52	-10
Cimetta	1672	-15	4	23	1	23	44	-15	-15	46	-16
Evolène-Villaz	1825	-16	4	21	1	21	43	-16	-16	46	-16
Grimsel-Hospiz	1980	-19	4	18	1	18	41	-19	-19	46	-22
Comprovasco	575	-8	2	28	1	28	44	-8	-8	46	-10
Lägern	868	-15	4	26	1	26	44	-15	-15	46	-16
Plaffeien	1042	-14	4	25	1	25	44	-14	-14	46	-16

Tabelle 10: Minimum- und Maximumtemperaturen, 95% Quantile und Binder Grades an 56 ANETZ-Stationen.

Station	Höhe	Ta				95% Wahrscheinl.					
		Minima		Maxima		Temperaturen				Binder	Grades
		Mittel	sd _{min}	Mittel	sd _{max}	Ta _{max}	TS _{max}	Ta _{min}	TS _{min}	HT	LT
La Dôle	1670	-19	4	21	1	23	43	-26	-26	46	-28
Payerne	490	-11	4	29	1	30	48	-17	-17	52	-22
Wynau	422	-11	4	27	1	29	46	-18	-18	46	-22
Vaduz	460	-12	2	27	1	28	45	-15	-15	46	-16
Aigle	381	-9	3	28	1	29	46	-15	-15	46	-16
Fahy	596	-13	4	27	1	28	45	-19	-19	46	-22
Montana	1508	-15	3	23	1	24	44	-21	-21	46	-22
Zermatt	1638	-17	4	24	1	25	46	-23	-23	46	-28
Chasseral	1599	-17	4	20	1	22	41	-24	-24	46	-28
Altdorf	449	-10	4	28	1	29	45	-16	-16	46	-16
Ulrichen	1345	-20	3	23	1	25	45	-25	-25	46	-28
Piotta	1007	-16	3	25	1	27	46	-21	-21	46	-22
Lugano	273	-4	2	29	1	31	47	-7	-7	52	-10
Samedan	1705	-30	4	23	1	24	45	-37	-37	46	-40
Chur-Ems	555	-12	2	28	1	29	46	-16	-16	46	-16
Napf	1406	-17	4	22	1	24	44	-24	-24	46	-28
Sion	482	-10	2	30	1	31	48	-14	-14	52	-16
Locarno-Magadino	197	-10	2	31	1	32	48	-13	-13	52	-16
Neuchâtel	485	-9	4	29	1	31	47	-15	-15	52	-16
Stabio	353	-8	2	30	1	31	46	-11	-11	46	-16
Interlaken	580	-12	4	27	1	28	44	-18	-18	46	-22
Disentis	1190	-15	3	26	1	27	46	-21	-21	46	-22
Hinterrhein	1611	-20	4	22	1	23	45	-26	-26	46	-28
Davos	1590	-20	4	22	1	24	45	-26	-26	46	-28
St.Gallen	779	-13	4	25	1	27	45	-19	-19	46	-22
Glarus	515	-12	2	27	1	28	45	-16	-16	46	-16
Genève-Cointrin	420	-9	4	30	1	31	47	-15	-15	52	-16
Zürich-Kloten	436	-11	4	28	1	30	46	-17	-17	46	-22
Gütsch	2287	-20	5	17	1	19	40	-28	-28	40	-28
Pully	461	-8	4	28	1	30	46	-15	-15	46	-16
Grand-St-Bernard	2472	-19	5	16	1	19	39	-27	-27	40	-28
Adelboden	1320	-16	4	23	1	25	43	-23	-23	46	-28
Visp	640	-14	2	28	1	30	46	-18	-18	46	-22
La Chaux-de-Fonds	1018	-17	5	24	1	26	44	-26	-26	46	-28
Rünenberg	610	-12	4	27	1	29	47	-19	-19	52	-22
Buchs-Suhr	387	-12	3	28	1	29	46	-18	-18	46	-22
Luzern	456	-10	4	28	1	30	45	-16	-16	46	-16
Engelberg	1035	-15	4	24	1	25	44	-22	-22	46	-22
Schaffhausen	437	-11	4	28	1	29	46	-17	-17	46	-22
Zürich-SMA	556	-10	4	27	1	29	46	-16	-16	46	-16
Basel-Binningen	316	-10	3	29	1	31	46	-17	-17	46	-22
Robbia	1078	-15	3	26	1	28	47	-20	-20	52	-22
Scuol	1298	-18	3	24	1	25	45	-24	-24	46	-28
Changins	430	-9	4	29	1	31	46	-15	-15	46	-16
La Frétaz	1202	-15	4	23	1	25	42	-21	-21	46	-22
Bern-Liebefeld	565	-12	4	27	1	29	45	-19	-19	46	-22
Güttingen	440	-12	4	28	1	30	46	-18	-18	46	-22
Wädenswil	463	-10	4	27	1	29	48	-17	-17	52	-22
Tänikon	536	-11	4	27	1	29	45	-17	-17	46	-22
Locarno-Monti	366	-5	2	31	1	32	49	-8	-8	52	-10
Cimetta	1672	-15	4	23	1	25	46	-21	-21	46	-22
Evolène-Villaz	1825	-16	4	21	1	23	45	-22	-22	46	-22
Grimsel-Hospiz	1980	-19	4	18	1	20	43	-27	-27	46	-28
Comprovasco	575	-8	2	28	1	29	46	-12	-12	46	-16
Lägern	868	-15	4	26	1	28	46	-21	-21	46	-22
Plaffeien	1042	-14	4	25	1	27	45	-21	-21	46	-22

Abbildung 9: Kartographische Darstellung der alle 2 Jahre auftretenden tiefsten Temperaturen an der Oberfläche (LT 50)

Abbildung 10: Kartographische Darstellung der alle 2 Jahre auftretenden heissesten 7-Tagesperiode in 2 cm Tiefe (HT 50)

Abbildung 11: Kartographische Darstellung der alle 20 Jahre auftretenden tiefsten Temperaturen an der Oberfläche (LT 95)

Abbildung 12: Kartographische Darstellung der alle 20 Jahre auftretenden heissesten 7-Tagesperiode in 2 cm Tiefe (HT 95)

6. Anwendung

6.1 Zur Wahl der Vertrauensgrenze (Zuverlässigkeit)

Die Klimadaten wurden, in Anlehnung an den Arbeiten von SHRP [24] für die Vertrauensgrenzen von 50% und 95 % erarbeitet; in den SHRP-Arbeiten wurden 50% und 98 % gewählt.

Eine ermittelte Temperatur mit einer Vertrauensgrenze von 50 % - beispielsweise die minimale Temperatur LT50 - wird statistisch gesehen alle 2 Jahre erreicht. Unseres Erachtens ist dieser Zeitraum für die Projektierung einer Strasse zu klein.

Die Wahl einer Vertrauensgrenze von 98 % würde hingegen bedeuten, dass die kritischen Temperaturen lediglich alle 50 Jahre einmal auftreten.

In Anlehnung an die bei der Dimensionierung eines Strassenoberbaus üblichen Nutzungsdauer von 20 Jahren wurden in der vorliegenden Arbeit die Temperaturen mit einer Vertrauensgrenze von 95 % berechnet. Dies bedeutet, dass die kritischen Temperaturen 1x innerhalb der Gebrauchsdauer auftreten.

Wir empfehlen die Verwendung der Klimadaten LT95 und HT95.

6.2 Leitfaden der Berechnung der Klimadaten

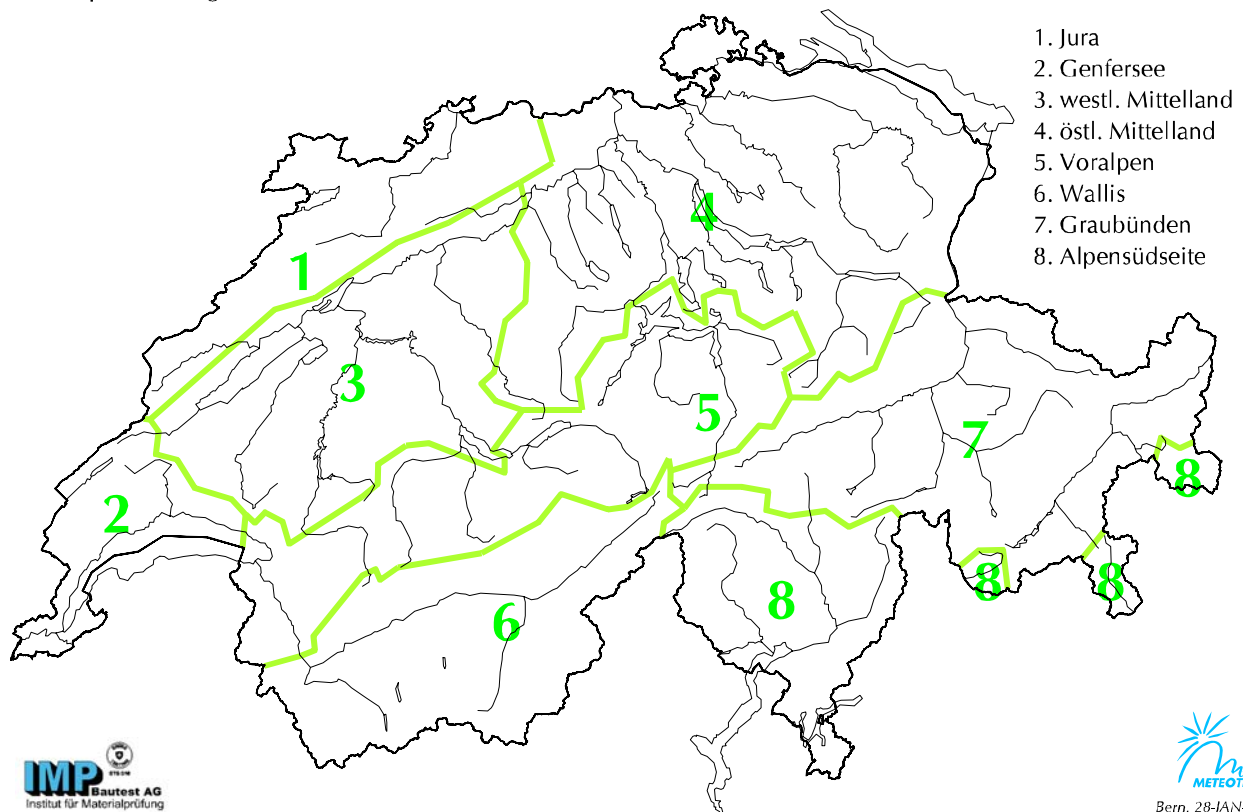
Die Abbildungen 9 bis 12 enthalten die klimatischen Daten in kartenform für die ganze Schweiz. In Nordamerika wird mit gleich grossen Karten für eine geographisch weit grössere Region gearbeitet. Die Genauigkeit der schweizerischen Karten ist somit ungleich grösser als die der nordamerikanischen. Trotzdem wird im Folgenden eine Anleitung gegeben, mit welcher objektbezogen und unter Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse, die Klimadaten ermittelt werden können.

Der Leitfaden zeigt, wie die Minimum- und Maximumtemperatur LT95 und HT95 für alle Punkte in der Schweiz (unterhalb 2500 m) berechnet werden können. Als Beispiel sollen die Temperaturen für Feutersoey (bei Gstaad) berechnet werden:

1. Schritt: Region Bestimmen: Feutersoey gehört zu den nördlichen Voralpen (Region Nr. 5, Abb. A13).

Abbildung 13: Einteilung der Schweiz in 8 Klimaregionen (leicht veränderte Einteilung der METEONORM).

Temperatur-Regionen



2. Schritt: Höhe des Standorts: 1130 m (z.B. in Landeskarte nachschlagen).

3. Schritt: Lage: Dieser Punkt muss sehr sorgfältig bestimmt werden, da er grosse Auswirkungen hat (Tab. 11 und 12). Ortskenntnisse sind erforderlich.

Tabelle 11: Lokale Lagekorrekturwerte in [°C].

Lage	Minimum	Maximum
Frei	0.0	0.0
Mulde	-2.5	0.0
Kaltluftsee	-6.0	1.0
See	2.0	-0.5
Stadt	0.5	0.5
Südhang	1.5	1.5
Ost-Hang	0.7	0.0
West-Hang	0.7	0.7
Wald	0.0	-6.0

Tabelle 12: Bemerkungen zu den Lageklassen.

Lage	Bemerkungen
Frei	Freier Standort, offenes Gelände, Nordhang, kein hoher Horizont.
Mulde	Kleine bis mittlere Mulden oder flache Täler, in denen sich, vor allem im Winter, Kaltluftseen bilden oder die schattig sind. Hauptsächlich im Jura und den Alpen aber auch im Mittelland (z.B.: La Chaux-de-Fonds, Hinterrhein und Visp).
Kaltluftsee	In diese Kategorie fallen die grossen Kaltluftseen vom Oberengadin und vom Goms (z.B. Samedan und Ulrichen).
See	Seeuferbereich von grösseren Seen. Der Standort sollte nicht weiter als 1 km vom Ufer entfernt sein und der See muss eine gewisse Grösse erreichen (z.B.: Pully und Lugano).
Stadt	Tritt nur im Zentrum von grösseren Städten auf (mehr als 100'000 Einwohner: Genf, Lausanne, Bern, Basel, Zürich).
Südhang	Nach Süden gerichteter Hang (ab ca. 10° Neigung). Hang muss sich über mindestens 100 Höhenmeter erstrecken (z.B. Montana und Locarno-Monti). Standorte südlich einer grossen Stützmauer (ab ca. 5 m Höhe).
West/Ost-Hang	Nach Westen oder Osten gerichteter Hang (ab ca. 10° Neigung). Hang muss sich über mindestens 100 Höhenmeter erstrecken (z.B. Adelboden).
Wald	Schattige Wald- oder andere Standorte, die selbst im Sommer kaum von der Sonne beschienen werden.

Für Feutersoey ist die Lageklasse **Mulde** zu wählen. Das Dorf liegt in einem Tal mit einem ziemlich flachen Talboden, in dem sich oft ein Kaltluftsee bildet. Für die Klasse Kaltluftsee ist dieser allerdings zu wenig ausgeprägt. Der Typ Kaltluftsee ist nur für die inneralpinen Täler wie das Goms oder das Engadin anzuwenden.

Lagekorrektur für:

Minimumtemperatur: **Lage Mulde: -2.5 °C**
 Maximumtemperatur: **Lage Mulde: 0.0 °C**

4. Schritt: Mit den Höhenregressionen können die Temperaturen folgendermassen berechnet werden (Tab. 13):

$$T_s = a \cdot h^3 + b \cdot h^2 + c \cdot h + d \quad (13)$$

wobei h die Höhe über Meer in km ist; für Feutersoey 1.13

Tabelle 13: Regionale Basiswerte und Höhengradienten der Minimum- und Maximumtemperaturen.

Nr.	Region	Minimum		Maximum			
		d	c	d	c	b	a
1	Jura	-8.3	-5.5	46.9	-5.0	0	0
2	Genfersee	-6.4	-7.3	46.1	-3.0	0	0
3	Westliches Mittelland	-6.8	-6.7	46.1	-3.0	0	0
4	Östliches Mittelland/Voralpen	-8.6	-5.7	46.1	-3.0	0	0
5	Nördl. Voralpen	-7.5	-5.6	45.1	-2.4	0	0
6	Wallis	-8.3	-4.8	60.3	-37.8	26.1	-5.9
7	Graubünden	-8.2	-6.5	51.8	-19.6	15.5	-4.2
8	Alpensüdseite	-6.9	-5.1	50.2	-17.2	15.2	-4.2

Minima:

Minimumtemperatur ohne Lagekorrektur: $T_{s_{\min}} = -5.6 \cdot 1.13 - 7.5 = -13.8^\circ\text{C}$
 mit Lagekorrektur: **-16.3 °C.**

Maxima:

Maximumtemperatur ohne Lagekorrektur: $T_{s_{\max}} = -2.4 \cdot 1.13 + 45.1 = 42.4^\circ\text{C}$
 mit Lagekorrektur: **42.4 °C.**

- 5. Schritt:** Berechnung der Maximumtemperatur in 7 cm Belagtiefe (für die Bestimmung der Maximum-Temperatur in einer Deckschicht wird die Temperatur in 2 cm Tiefe bestimmt; bei Tragschichten in 7 cm Tiefe).
Mit Gleichung 14 kann die Temperatur in 7 cm Tiefe direkt aus der Temperatur in 2 cm Tiefe berechnet werden:

$$T_{s_{\max,7cm}} = 0.9127 \cdot T_{s_{\max,2cm}} - 1.55 \quad (14)$$

Für Feutersoey ergibt dies eine Temperatur in 7 cm Tiefe von 37.1°C.

- 6. Schritt:** Berechnung der Standardabweichung mit Gleichungen 15 (sd_{\min}) und 16 (sd_{\max}):

Allgemein:

$$sd_{\min} = 3.3 + 0.52 \cdot h$$

Für Wallis, Graubünden und Tessin:

$$sd_{\min} = 1.4 + 1.31 \cdot h \quad (15)$$

$$\mathbf{sd_{\min} = 3.9 \text{ °C}}$$

Allgemein:

$$sd_{\max} = 0.8 + 0.23 \cdot h$$

Für Alpentäler:

$$sd_{\max} = 0.5 + 0.24 \cdot h$$

$$\mathbf{sd_{\max} = 0.8 \text{ °C}}$$

(16)

- 7. Schritt:** Berechnung der 95% Quantile mit Gleichung 17:

$$T_{s_{\min,95\%}} = T_{s_{\min}} - 1.77 \cdot sd_{\min}$$

$$T_{s_{\max,95\%}} = T_{s_{\max}} + 1.77 \cdot sd_{\max}$$

$$\mathbf{T_{s_{\min,95\%}} = -23.2 \text{ °C} \quad T_{s_{\max,95\%}} = 43.8 \text{ °C (in 2 cm Tiefe)}}$$

(17)

- 8. Schritt:** Berechnung der LT95, HT95 Werte mit Gleichung 18

$$LT95 = [\text{Runden}(T_{s_{\min}} - 1)/6] * 6 - 4$$

$$HT95 = [\text{Runden}(T_{s_{\max}} + 1)/6] * 6 + 4$$

$$\mathbf{LT95 = -28}$$

$$\mathbf{HT95 = 46}$$

(18)

Für das Beispiel von Feutersoey ergibt sich ein Bitumen PG 46-28.

6.3 Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung

Die Wahl der Bitumensorte (Performance Grade PG) im Superpave erfolgt in einem ersten Schritt anhand der auf dem Objekt zu erwartenden Temperaturen. Dabei wurden in Rahmen der Entwicklung des SHRP-Binder-Grade-Systems von einer Standard - Verkehrsbelastung ausgegangen.

Bei erhöhten Beanspruchungen sind Korrekturen vorzunehmen, um die Art und Menge des Verkehrs im Hinblick auf Spurrinnenbildung zu berücksichtigen [25, 26].

- Bei langsam rollendem Verkehr:
Maximaltemperatur der Bindemittelsorte um eine Klasse höher wählen; zum Beispiel PG 56 statt PG 52.
- Bei stehendem Verkehr (zum Beispiel Lastwagenparkplätze):
Maximaltemperatur der Bindemittelsorte um zwei Klassen höher wählen; zum Beispiel PG 64 statt PG 52.
- Bei sehr hoher Verkehrsbeanspruchung:
Eine sehr hohe Verkehrsbelastung liegt dann vor, wenn die Anzahl ESAL (equivalent single axle loads) zwischen 10 und 30 Mio liegt. Dies entspricht etwa einer Verkehrslastklasse gem. SN 640 4316 [27] von T5 "sehr schwerer Verkehr".
Maximaltemperatur der Bindemittelsorte um eine Klasse höher wählen; zum Beispiel PG 56 statt PG 52.
- Bei extrem hoher Verkehrsbeanspruchung (T6 "extrem schwerer Verkehr"):
Maximaltemperatur der Bindemittelsorte um zwei Klassen höher wählen; zum Beispiel PG 64 statt PG 52.

6.4 Vergleich der SHRP-Bitumenklassifikation mit europäischen Bitumensorten

Die beiden Klassifizierungsmethoden für Bindemittel (konventionell, SHRP) sind grundsätzlich verschieden.

Die konventionelle Methode basiert auf der Nadelpenetration bei 25°C sowie weiteren empirischen Versuchen (EP RuK, BP-Fraass etc.).

Bei der SHRP-Methode werden physikalische Eigenschaften direkt angesprochen (z.B. Steifigkeit). Es wurden Grenzwerte für diese physikalischen Eigenschaften festgelegt. Die Bitumen werden aufgrund der Prüftemperatur, bei welcher die Grenzwerte erreicht werden, in sog. Performance Grades PG eingeteilt.

Trotz der grundsätzlichen Unterschiede ist eine Gegenüberstellung der beiden Methoden hilfreich. Diese Gegenüberstellung soll als grobe Orientierungshilfe dienen.

Tabelle 14: Vergleiche der Klassifizierungssysteme (aus [9])

Pen bei 25°C 1/10mm	EP RuK °C	BP Fraass °C	Sorte gem SN 671 110 [27]	SHRP PG
27	63	-7	B 20/30	PG 82-22
58	49.5	-10	B 55/70	PG 64-22
84	47	-17	B 80/100	PG 58-28
83	48	-16	B 80/100	PG 64-22
88	45.5	-13	B 80/100	PG 58-22
180	40	-17	B 180/220	PG 46-28

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, gibt es Überschneidungen bei der Verwendung der beiden Klassifizierungssysteme. Zwei als B 80/100 erkannte Bitumen werden in unterschiedliche PG-Klassen eingeteilt (PG 58-28 und PG 64-22). Umgekehrt werden zwei als PG 64-22 erkannte Bitumen im bisherigen System als B 55/70 bzw B 80/100 klassiert.

Wie Litzka [9] festgestellt hat, scheinen die oberen Temperaturen der PG besser mit dem Erweichungspunkt RuK als mit der Penetration zu korrelieren. Zwischen der unteren Temperatur der PG und dem Brechpunkt Fraass ergab sich ein guter Zusammenhang. Allerdings sind diese Zusammenhänge durch grössere Reihenuntersuchungen zu überprüfen.

7. Literatur

- 1 Angst Ch. Das SHRP-Programm; Strasse und Verkehr 7/91
- 2 Bellin P. Ergebnisse der amerikanischen SHRP-Forschung: Strasse und Autobahn 5/96
- 3 Bellin P. Die Ergebnisse der Bitumen- und Asphaltforschung des Strategic Highway Research Programm SHRP, Teil 1 Bitumen 2/95
Teil 2 Bitumen 2/97
- 4 Partl M. Strategic Highway Research Programm SHRP, Überblick und Erfahrungen, Strasse und Verkehr 4/95
- 5 Chappat M
Ferraro Maia A. Pour y voir clair dans les essais SHRP et dans leur application aux bitumes polymères, Revue générale des routes juillet - août
- 6 Such Ch.
Ramond G. Les spécifications SHRP une tentative de décryptage; Revue Générales des Routes Juin/1995
- 7 Angst Ch.
Riedi M. Comparison of bending beam rheometer with cracking-performance of polymer modified asphalt; The Rheology of Bituminous Binders, European Workshop, April 95, Brussel
- 8 Migliori F. Etude du comportement à basse température des bitumes routiers; application du bending beam rheometer; bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, mars - avril 1996.
- 9 Litzka J., Strobl R
Pass F., Augustin Gebrauchsvorhaltensorientierte Bitumenprüfung, Mitteilung Nr 9 des Institut für Strassenbau und Strassenerhaltung der Technischen Universität Wien, Wien 1998
- 10 Leclerc A.-M.,
Moreux J., Côté D.,
Tourangeau G. Caractérisation et guide de sélection des bitumes; l'expérience du Quebec; Revue générales des routes; avril 1998
- 11 Remund J.,
Kunz S. METEONORM, Global meteorological database for solar energy and applied climatology.
Meteotest, Fabrikstrasse14, CH-3007 Bern. 1997
- 12 Remund J.,
Salvisberg E.,
Kunz S. On the generation of hourly shortwave radiation data on tilted surfaces. Solar Energy, Vol. 62, No. 5, pp. 331-344. 1998
- 13 Gilgen H., Wild M.,
Ohmura A. Means and Trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data. Journal of Climate, Vol. 11, No. 8, August 1998.

- 14 Aguiar R., Collares-Pereira M. A simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of markov transition matrices. Solar Energy, Vol. 40, No.3, pp. 269-279; 1988
- 15 Aguiar R., Collares-Pereira M. TAG: A time-dependent auto-regressive, Gaussian model. Solar Energy, Vol. 49, No.3, pp. 167-174; 1992
- 16 Eidg. Materialprüf. Anstalt (EMPA) Proposal for calculating the thermal irradiance of the environment. Draft; 1985
- 17 Holtslag A.A.M., van Ulden A.P Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications. Journal of Climate and Applied Meteorology, 24, pp. 1996-1207; 1985.
- 18 Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt (SMA) Klimatologie der Schweiz, C, Lufttemperatur Beiheft zu den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt; 1995.
- 19 Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt (SMA) Klimatologie der Schweiz, C, Lufttemperatur. Beiheft zu den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt; 1967.
- 20 Dumont G., Schwéry B., Angst Ch. Planches comparatives de différents bitume modifiés et ajouts, 4ième Symposium Eurobitume, Octobre 89, Madrid
- 21 Schwéry B., Angst Ch. Long term behaviour of the bituminous mixes issued of the Comparative test sections realized in Switzerland, 5th Eurobitume Congress, Juni 93 Stockholm
- 22 Dumont A.-G., Schwéry B., Angst Ch. Planche comparatives avec bitumes modifiés et ajouts; rapport n° 1: Chaussée et liants; EVED Bericht Nr. 313, Oktober 1994
- 23 Leibundgut H. Wirkungen des Waldes auf die Umwelt des Menschen, Eugen Rentsch Verlag, Zürich und Stuttgart
- 24 SHRP-A-648 Weather Database for the Superpave Mix Design System
- 25 Asphalt Institute Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing; Superpave Series No. 1; Lexington 1997
- 26 Asphalt Institute Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing; Superpave Series No. 2; Lexington 1996
- 27 SN 640 431b Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung; Schweizer Norm SN 640 431b; 1997