
Baumaterialien für Städte im Klimawandel

Materialkatalog mit Empfehlungen

2. Auflage

Caroline Hoffmann, Achim Geissler



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Bundesamt für Wohnungswesen BWO



Inhalt

	Vorwort 2. Auflage	7
	Zusammenfassung	8
	Abkürzungsverzeichnis	15
1	Kurzeinführung	16
1.1	Hintergrund	16
1.2	Aufbau Materialkatalog	26
1.2.1	Ergebnisse für zentrale Parameter	27
1.2.2	Gesamtbewertung über alle Parameter	29
1.2.3	Datensammlung	30
2	Ergebnisse für zentrale Parameter	34
2.1	Städtisches Mikroklima	34
2.1.1	Resultate Tag (PET, bzw. θ_a) und Nacht (Aussentemperatur, θ_a)	34
2.1.2	Bewertung und Schlussfolgerung	39
2.2	Strahlungstechnische Grössen	46
2.2.1	Albedo	46
2.2.2	Solar Reflectance Index (SRI)	48
2.2.3	Visuelle Eigenschaften	50
2.3	Nachhaltigkeit	52
2.3.1	Lebensdauer	52
2.3.2	Treibhausgasemissionen (Total)	54
2.4	Akustische Eigenschaften: Gewichtung Schallabsorptionsgrad	56
2.5	Versickerungsfähigkeit (Böden und Dächer): Abflussbeiwert	58
3	Gesamtbewertung über alle Parameter	60
3.1	Wände	60
3.1.1	Zweischalige Wandkonstruktionen	60
3.1.2	Verputzte Aussendämmung	61
3.1.3	Glassfassade/Leichtbau	62
3.1.4	Hinterlüftete Fassade	63
3.1.5	Reflektierende Anstriche	64
3.2	Böden	64
3.3	Dächer	66
3.4	Zusammenfassung	68
3.4.1	Wände	68
3.4.2	Böden	68
3.4.3	Dächer	68

4	Datensammlung	70
4.1	Zweischalige Wandkonstruktionen	70
4.1.1	Sichtbetonwand mit Kerndämmung	70
4.1.2	Zweischalenmauerwerk mit Kerndämmung, Sichtbackstein aussen	74
4.1.3	Zweischalenmauerwerk verputzt	78
4.2	Verputzte Aussendämmung	82
4.2.1	Einschalenbacksteinmauerwerk mit 7 cm Dämmputz	82
4.2.2	Einschalenbacksteinmauerwerk mit 4 cm Aerogeldämmputz	86
4.2.3	Kompaktfassade (EPS)	90
4.2.4	Kompaktfassade (Steinwolle)	94
4.3	Glassfassade / Leichtbau	98
4.3.1	Glassfassade (g-Wert 0.3)	98
4.3.2	Glassfassade mit Rafflamellenstore (geschlossen)	102
4.3.3	Sandwichpaneele (Leichtbaufassade Gewerbe-, Industriebau)	106
4.4	Hinterlüftete Fassade	110
4.4.1	Holzverkleidung vor Holzständerwand mit Aussenwärmedämmung	110
4.4.2	PV (hinterlüftet, Dämmung Steinwolle)	112
4.4.3	Metallblechverkleidung	116
4.4.4	Faserzementverkleidung, Eternit	120
4.4.5	Kunststein / Natursteinverkleidung	124
4.4.6	Vorgehängtes Begrünungselement	126
4.5	Reflektierende Anstriche Wand	130
4.5.1	Reflektierender Anstrich auf Putz und Einschalenmauerwerk	130
4.6	Umgebung Boden	134
4.6.1	Rasengittersteinpflasterung für Wege/befahrbare Flächen	134
4.6.2	Betonbelag	138
4.6.3	Betonsteinpflasterung für Wege, befahrbar	142
4.6.4	Steinplattenpflasterung für Wege	146
4.6.5	Schwarzbelag (Asphalt)	150
4.6.6	Whitetopping auf Asphalt	154
4.6.7	Kiesbelag	158
4.6.8	Chaussierung (Wassergebundene Deckschicht)	162
4.6.9	Rasen	166
4.6.10	Wiese	174
4.7	Dächer	182
4.7.1	Dachkonstruktion belüftet mit Ziegeldeckung	182
4.7.2	Dachkonstruktion belüftet mit Metalldeckung	186
4.7.3	Dachkonstruktion belüftet mit Faserzementdeckung	190
4.7.4	Dachkonstruktion ohne Schutz- und Nutzschichten	194
4.7.5	Dachkonstruktion bekies	198
4.7.6	Dachkonstruktion mit Extensivbegrünung	202
4.7.7	Dachkonstruktion mit Intensivbegrünung	206
4.7.8	Dachkonstruktion vollflächig mit PV/Kollektoren	210
4.7.9	Dachkonstruktion 50% PV/Kollektoren, 50% Extensivbegrünung	214

5	Anhang 1: Methodik Materialkatalog	218
5.1	Auswahl Materialien	218
5.1.1	Benennung Materialien	218
5.1.2	Berücksichtigung von mehrschichtigen Konstruktionen	218
5.1.3	Farbgebung der Materialien	219
5.1.4	Aufbau der Materialien	219
5.1.5	Bewertung der Materialien	222
5.2	Berücksichtigte Grössen des Materialkatalogs	223
5.2.1	Übersicht	223
5.2.2	Erläuterungen zu einigen Grössen	224
5.3	Datengewinnung	229
5.3.1	Kriterien für die Materialdatensuche aus Sammlungen	229
5.3.2	Plausibilitätscheck Daten aus Sammlungen	229
5.4	Auswahl zentrale Parameter und ihre Bewertung	230
5.4.1	Bewertung Schallabsorptionsgrad	230
5.5	Böden für Grünflächen	232
5.5.1	Betrachtete Böden	232
5.5.2	Eigenschaften von Torfersatzprodukten	232
6	Anhang 2: Methodik und kritische Diskussion der Simulationen	233
6.1	Simulationsprogramm städtisches Mikroklima	233
6.2	Randbedingungen der Simulationen des städtischen Mikroklimas	233
6.2.1	Betrachtung Bauteile und Begrünungen	234
6.2.2	Klima, Betrachtungszeitraum und ausgewertete Grössen	235
6.2.3	Betrachteter Ausschnitt	235
6.2.4	Dächer	236
6.2.5	Umgebung Modell	237
6.2.6	Startbedingungen für die Simulation	238
6.3	Literaturrecherche zu hellen und dunklen Bodenbelägen	238
6.3.1	Methodik	238
6.3.2	Ergebnisse	239
6.4	Kritische Diskussion Simulationsergebnisse für das städtische Mikroklima	241
6.4.1	Bodenmaterialien	241
6.4.2	Wandmaterialien	246
6.4.3	Dachmaterialien	248
6.4.4	Raumlufttemperatur im Gebäude	249
6.4.5	Streuung Ergebnisse im betrachteten Ausschnitt	249
7	Anhang 3: Literatur	251



Vorwort 2. Auflage

Laut den neuesten Klimaszenarien für die Schweiz erwarten uns in den nächsten Jahrzehnten steigende Temperaturen und häufigere Extremwetterereignisse. Die höheren Sommertemperaturen haben starke Auswirkungen auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bevölkerung – insbesondere auch, weil sich die Höchsttemperaturen und die Anzahl der Hitzetage stark erhöhen werden.

Städte und andere dicht bebaute Gebiete heizen sich stärker auf als das Umland. In urbanen Gebieten ist ausserdem die Auskühlung während der Nacht schwächer als auf dem Land. Dieser sogenannte Hitzeinseleffekt kann mit der Art der Bebauung und mit der Wahl der Baumaterialien beeinflusst werden.

Hier setzt der vorliegende Materialkatalog an. Er untersucht Materialien im Aussenbereich – Bodenbeläge, Fassaden und Dachkonstruktionen – auf ihre Auswirkungen auf die städtische Aussentemperatur und vergleicht verschiedene Materialien miteinander. Er dient als Nachschlagewerk für Planerinnen und Planer und berücksichtigt, neben dem Effekt der Materialien auf die Hitze in der Stadt, auch andere wichtige Eigenschaften der Materialien, wie die Blendung, die Lebensdauer oder – bei Bodenbelägen – die Versickerung.

Für die vorliegende zweite Auflage wurde der im Jahr 2022 veröffentlichte Materialkatalog umfassend überarbeitet und erweitert. Er umfasst neu Dachkonstruktionen und Begrünungen, wobei die Begrünungen in trockenem und feuchtem Zustand untersucht werden. Aufgrund von Verbesserungen der Simulationssoftware ENVI-met, mittels derer die Auswirkungen der verschiedenen Materialien auf die Aussentemperatur ermittelt wurden, wurden die Werte auch für die bereits in der ersten Auflage enthaltenen Materialien noch einmal simuliert. Die in der Neuauflage dargestellten Ergebnisse beziehen sich somit alle auf die Programmversion 5.6.1.

Unser Umgang mit dem Hitzeeffekt ist wegweisend für die Zukunft: Die gebaute Umwelt ist langlebig, so dass heute verbaute Materialien auch in den kommenden Jahrzehnten einen Einfluss auf das städtische Klima haben werden. Wir appellieren deshalb an Planende und Bauträgerschaften, den Effekt der Baumaterialien auf die Hitze in der Stadt in ihre Planung mit einzubeziehen und sich hierfür des Nachschlagewerks zu bedienen. Dabei dürften unseres Erachtens vor allem die zusammenfassende Tabelle zu Beginn sowie die ausführlichen Resultate in den Kapiteln 2 und 4 des Materialkatalogs nützlich sein.

Wir freuen uns, dass wir den Materialkatalog und seine Erweiterung zusammen mit dem Bundesamt für Energie BFE und dem Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt ermöglichen konnten, danken der Autorenschaft für die sorgfältige Arbeit und hoffen auf eine zahlreiche Leserschaft.

Bundesamt für Wohnungswesen BWO

Zusammenfassung

Im städtischen Umfeld können ein hoher Bebauungsgrad mit wärmespeichernden Materialien und versiegelte Oberflächen im Sommer zu Hitzestress und einer reduzierten nächtlichen Auskühlung führen. Die richtige Auswahl von Baumaterialien kann dazu beitragen, diese Effekte zu mindern. Der Materialkatalog bewertet Materialien und Begrünungen für Fassaden, gebäudenähe Böden und Dächer auf ihre Wirkung hinsichtlich des städtischen Mikroklimas. Dabei wird zur Vereinfachung jeweils eine Kombination aus Oberflächenmaterial oder Begrünung, Konstruktion und Farbgebung der Oberfläche als «Material» bezeichnet. Um eine ganzheitliche Betrachtung von Materialien zu ermöglichen, werden zusätzlich Aspekte wie Blendung, Akustik, Treibhausgasemissionen und Lebensdauer bewertet. Der Materialkatalog umfasst 66 Materialien sowie 17 Varianten für Begrünungen von Fassade, Boden und Dach. Die einzelnen Materialien werden aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet: zunächst über eine Datensammlung von 35 Kenngrößen zum Material selbst, dann über eine vergleichende Analyse für ausgewählte Parameter. Diese im Rahmen des Projektes ausgewählten Parameter stammen aus fünf Themenbereichen:

- Auswirkung auf das städtische Mikroklima: Tagsüber physiologisch äquivalente Temperatur (PET, auf Fussgängerniveau) und Aussenlufttemperatur (über Dächern), nachts Aussenlufttemperatur.
- Strahlungstechnische Grössen: Albedo, Solar Reflectance Index, Visuelle Reflexion (Blendung)
- Nachhaltigkeit: Lebensdauer, Treibhausgasemissionen
- Akustische Eigenschaften: Gewichteter Schallabsorptionsgrad
- Versickerungsfähigkeit (Böden und Dächer): Abflussbeiwert

Die Auswirkung der Materialien auf das städtische Mikroklima wird anhand von zwei Parametern charakterisiert: tagsüber wird für Böden und Fassaden die PET und für Dächer die Aussenlufttemperatur herangezogen; nachts ist für alle Oberflächen die Aussenlufttemperatur bestimmend. Die Resultate werden mittels Simulationen eines dreidimensionalen Mikroklimamodells für ein Areal in Basel gewonnen. Dabei wird eine viertägige Hitzewelle in Basel mit Wetterdaten von der ersten Augustwoche 2018 betrachtet. Am vierten Tag wird um 04:00 Uhr morgens für alle Materialien die Aussenlufttemperatur ausgewertet. Um 14:00 Uhr nachmittags wird für Böden und Wände, bei denen der thermische Komfort im Aussenbereich einer Rolle spielt, die PET ausgewiesen. Für Dächer, bei denen der thermische Komfort in der Regel nicht relevant ist, ist die Aussenlufttemperatur über dem Dach massgebend. Die Aussenlufttemperatur der Wetterdaten beträgt am vierten Tag um 04:00 Uhr morgens 21.2 °C und um 14:00 Uhr 34.8 °C. Für Böden und Wände werden zehn Standorte (Sensoren) im Areal auf 1.7 m Höhe untersucht und die Ergebnisse aller zehn Standorte gemittelt. Für die Dächer werden fünf Standorte 1.6 m über der Dachebene gemittelt. Die nachstehenden Tabellen zeigen alle untersuchten Materialien sortiert nach der Höhe der resultierenden PET, bzw. der Aussenlufttemperatur. Eine weitere Tabelle zeigt die Aussenlufttemperatur über den Dächern tagsüber.

Für alle Wandkonstruktionen liegt die tiefste PET bei 32.3 °C und die höchste PET bei 40.6 °C, die Spannweite beträgt also 8.3 K. Wenn zwischen dunklen und hellen Farben gewählt werden kann, so verursacht dies bei der PET je nach Material eine Differenz zwischen 2.0 und 4.1 K. Dabei haben die hellgefärbten Materialien stets eine höhere PET als die dunklen Materialien. Dies liegt daran, dass helle Materialien mehr Strahlung reflektieren als dunkle, was den thermischen Komfort von Personen in der Nähe beeinträchtigt. Die Aussenlufttemperatur bei Verwendung von dunklen Materialien ist hingegen in der Regel höher als jene bei Verwendung von hellen Materialien.

Die drei Wandkonstruktionen, welche die tiefste PET hervorrufen, sind dunkle Metallkonstruktionen. Dies ist auf die geringere Strahlungsreflektion zurückzuführen.

Weitere Wandkonstruktionen, die zu einer tiefen PET führen sind ein (feuchtes) Begrünungselement und hinterlüftete Fassaden mit Metallblech-, Faserzementverkleidung oder Photovoltaik. Insgesamt sind unter den 16 Wandmaterialien, die eine PET $< 38\text{ °C}$ hervorrufen, neun hinterlüftete Konstruktionen. Dieses Ergebnis ist robust, da das in der Simulationsumgebung verfügbare vereinfachte Modell der Hinterlüftung die Wirksamkeit der Luftzirkulation unterschätzt.

Bei den Bodenkonstruktionen zeigen die Simulationsergebnisse, dass die betrachteten Materialien zu Unterschieden bei der PET von 1.0 K führen. Die mittleren Werte für die PET aller Sensoren liegen zwischen 37.6 °C und 38.5 °C . Da die PET auch von direkter Sonneneinstrahlung und Wind beeinflusst wird, zeigt dies, dass ohne zusätzliche Beschattungsmassnahmen allein durch den Bodenbelag keine markante Verbesserung des Mikroklimas erreicht wird. Bei den Begrünungskombinationen für die Böden entstehen Differenzen von 4.7 K bei mittleren Werten für alle Sensoren zwischen 33.3 und 38.0 °C . Die Kombination von feuchter Begrünung mit Bäumen ist am vorteilhaftesten.

Bei den Dachmaterialien beträgt die Differenz für die Lufttemperatur 1.6 m über dem Dach bei den nichtgrünen Materialien 0.3 K. Über hellen Dächern stellt sich eine tiefere Lufttemperatur ein als über dunklen Dächern. Der Minimalwert liegt bei 37.6 K. Der Minimalwert für die begrünten, feuchten Dächer liegt mit 37.3 K leicht tiefer.

Schlechte Ergebnisse für trockene begrünte Fassaden, trockene Begrünungskombinationen und trockene Gründächer können damit erklärt werden, dass die in den Simulationen ausgewertete Periode am Ende einer Hitzewelle liegt und die oberen Schichten des Bodens und die Wand als ausgetrocknet angenommen sind. Unter den gewählten Einstellungen im Simulationsprogramm (und auch in der Realität) ist der Verdunstungseffekt damit nicht mehr vorhanden. Vor dem Hintergrund des Klimawandels mit längeren Trockenperioden (und potenziellen Bewässerungsverboten) sollen diese Ergebnisse dazu anregen, Grünflächen mit einem entsprechenden Beschattungs- und Bewässerungskonzept (Regenwasser) einzuplanen. Dass dies die PET senken kann, zeigen die Simulationsergebnisse mit einer Reduktion um bis zu 2.6 K. Feuchte Grünflächen bewirken tagsüber also einen deutlich reduzierten Hitzestress. Eine Beschattung verstärkt diesen Effekt noch. Nachts ist die Aussenlufttemperaturreduktion geringer.

Aus den Simulationsergebnissen lassen sich Empfehlungen für die Materialwahl ableiten, die sich je nach stadtklimatischer Zielsetzung unterscheiden. Zur Verringerung des städtischen Wärmeinseleffekts und zur Verbesserung des thermischen Komforts im Aufenthaltsbereich ist, wo immer möglich, eine (bewässerte) Begrünung zu wählen. Bei Böden am besten in Kombination mit Bäumen. Ist keine Begrünung möglich, sind zur Verbesserung des thermischen Komforts bei den Böden eher mittelgetönte, versickerungsfähige Beläge zu wählen (in Kombination mit einer wirksamen Verschattung). Bei den Fassaden sind nach begrünten Fassaden, hinterlüftete Fassaden und Leichtbaufassaden mit mittelgetönten Farben zu empfehlen. Der städtische Wärmeinseleffekt, sowohl bezogen auf die Oberflächentemperatur als auch auf die Aussenlufttemperatur am Tag und in der Nacht, wird generell durch möglichst helle Oberflächen verringert.

Der Materialkatalog richtet sich an Planende und Entscheidungsträger von Bauprojekten in einem frühen, konzeptionellen Planungsstadium. Er bietet Hilfestellung dazu, Materialien im Spannungsfeld zwischen bestmöglichen Eigenschaften für einen geringen Hitzestress, bauphysikalischen und energierelevanten Anforderungen, sowie der Nachhaltigkeit zu bewerten.

Materialdatensammlung sortiert nach PET tagsüber

	PET Tag	Aussentemperatur (Luft) Nacht	Albedo	Solar Reflectance Index (SRI)
Wandkonstruktionen	°C	°C	–	–
LB_Glasfassade_Sonnenschutz_d	32.3	22.0	0.08	0
HF_Metallblechverkleidung_d	33.5	22.8	0.08	0
LB_Sandwichpaneel_d	33.5	22.8	0.08	0
HF_Begrünungselement_feucht	34.6	21.4	0.25	27
HF_Metallblechverkleidung_b	35.0	22.6	0.36	25
HF_Faserzementverkleidung_d	35.3	22.9	0.26	35
HF_Photovoltaik	35.8	22.7	0.16	1
LB_Glasfassade_Sonnenschutz_h	36.0	22.0	0.68	81
HF_Faserzementverkleidung_m	36.4	22.9	0.45	53
HF_Metallblechverkleidung_h	36.9	22.5	0.68	81
VA_Kompaktfassade_EPS_d	36.9	23.1	0.26	35
LB_Sandwichpaneel_h	37.0	22.6	0.68	81
HF_Steinverkleidung	37.0	22.9	0.28	23
ZW_Sichtbetonwand_Kerndämmung	37.3	22.9	0.38	44
HF_Holzverkleidung	37.4	22.6	0.35	38
LB_Sandwichpaneel_b	37.6	22.7	0.40	3
HF_Faserzementverkleidung	37.7	22.9	0.63	63
VA_Kompaktfassade_EPS_m	37.7	23.1	0.45	53
VA_Kompaktfassade_Steinwolle_d	37.9	22.7	0.26	35
ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschicht_d	38.0	22.9	0.26	35
Reflektierender_Anstrich_d	38.1	22.7	0.42	50
HF_Begrünungselement_trocken	38.2	22.4	0.25	27
VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Dämmputz_d	38.3	22.4	0.26	35
LB_Glasfassade	38.3	22.1	0.31	n. vorhanden
VA_Kompaktfassade_Steinwolle_m	38.6	22.7	0.45	53
VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz_d	38.6	22.3	0.26	35
ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschicht_m	38.6	22.9	0.45	53
ZW_Zweischalenmauerwerk_Kerndämmung	38.6	22.8	0.55	64
HF_Faserzementverkleidung_h	38.7	22.9	0.75	86
VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Dämmputz_m	38.9	22.4	0.45	53
VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz_m	39.2	22.3	0.45	53
VA_Kompaktfassade_EPS_h	39.5	22.9	0.75	86
Reflektierender_Anstrich_m	39.5	22.6	0.69	83
VA_Kompaktfassade_Steinwolle_h	40.1	22.6	0.75	86
ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschicht_h	40.2	22.7	0.75	86
Reflektierender_Anstrich_h	40.3	22.3	0.81	100
VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Dämmputz_h	40.4	22.3	0.75	86
VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz_h	40.6	22.2	0.75	86

Informationen zur Tabelle

Verwendete Abkürzungen:

b blank
 B Umgebung Boden
 D Dach
 d dunkel
 EPS Expandiertes Polystyrol
 h hell
 HF Hinterlüftete Fassade
 LB Glasfassade/Leichtbau

m mittel
 min erhöhter mineralischer Anteil
 n. nicht
 org erhöhter organischer Anteil
 PET Physiologisch Äquivalente Temperatur
 VA Verputzte Aussendämmung
 ZW Zweischalige Wandkonstruktionen

Reflexion (visuelle Eigenschaften)	Lebensdauer	Bewertung Schallabsorptionsgrad	Treibhausgasemissionen, Total	Abflussbeiwert
–	Jahre	–	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	–
0.10	25	n. vorhanden	60	n. zutreffend
0.10	50	n. vorhanden	18	n. zutreffend
0.10	n. vorhanden	2.4	57	n. zutreffend
0.25	n. vorhanden	6.0	n. vorhanden	n. zutreffend
0.60	50	n. vorhanden	14	n. zutreffend
0.25	50	3.2	16	n. zutreffend
0.09	35	1.9	203	n. zutreffend
0.80	25	n. vorhanden	60	n. zutreffend
0.50	50	3.2	16	n. zutreffend
0.80	50	n. vorhanden	18	n. zutreffend
0.25	30	1.0	29	n. zutreffend
0.80	n. vorhanden	2.4	57	n. zutreffend
0.23	50	1.7	n. vorhanden	n. zutreffend
0.50	50	1.2	57	n. zutreffend
0.30	30	5.1	2	n. zutreffend
0.66	n. vorhanden	2.4	52	n. zutreffend
0.30	50	3.2	16	n. zutreffend
0.50	30	1.0	29	n. zutreffend
0.25	30	1.3	21	n. zutreffend
0.25	45	1.7	36	n. zutreffend
0.25	n. vorhanden	1.7	n. vorhanden	n. zutreffend
0.25	n. vorhanden	6.0	n. vorhanden	n. zutreffend
0.25	n. vorhanden	1.7	n. vorhanden	n. zutreffend
0.15	30	1.9	111	n. zutreffend
0.50	30	1.3	21	n. zutreffend
0.25	n. vorhanden	1.7	n. vorhanden	n. zutreffend
0.50	45	1.7	36	n. zutreffend
0.13	50	1.9	61	n. zutreffend
0.70	50	3.2	16	n. zutreffend
0.50	n. vorhanden	1.7	n. vorhanden	n. zutreffend
0.50	n. vorhanden	1.7	n. vorhanden	n. zutreffend
0.70	30	1.0	29	n. zutreffend
0.50	n. vorhanden	1.7	n. vorhanden	n. zutreffend
0.70	30	1.3	21	n. zutreffend
0.70	45	1.7	36	n. zutreffend
0.70	n. vorhanden	1.7	n. vorhanden	n. zutreffend
0.70	n. vorhanden	1.7	n. vorhanden	n. zutreffend
0.70	n. vorhanden	1.7	n. vorhanden	n. zutreffend

Zur Einordnung der Werte:

- PET Tag: 35–41 °C werden als starke Wärmebelastung, 29–35 °C als mässige Wärmebelastung eingestuft.
- Aussentemperatur (Luft) Nacht: Eine hohe Lufttemperatur verhindert eine nächtliche Auskühlung der Gebäude
- Albedo: Bei einer hohen Albedo wird ein Grossteil der Strahlung reflektiert.
- Solar Reflectance Index (SRI): Je höher der SRI-Wert ist, desto geringer ist die Erwärmung der Oberfläche infolge solarer Strahlung.
- Reflexion (visuelle Eigenschaften): Ein hoher Reflexionsgrad kann Blendung hervorrufen.
- Lebensdauer: Eine lange Lebensdauer kann Ressourcen sparen, da ein Ersatz erst später notwendig wird.
- Bewertung Schallabsorptionsgrad: Die Bewertung erfolgt auf einer Skala von 1 bis 6. Ein hoher Wert weist auf eine dämpfende Akustik im Strassenraum hin.
- Treibhausgasemissionen, Total (Herstellung und Entsorgung): Ein hoher Wert bedeutet hohe Emissionen bei Herstellung und Entsorgung.
- Abflussbeiwert: Ein tiefer Abflussbeiwert weist auf eine gute Versickerung hin.

Materialdatensammlung sortiert nach PET tagsüber

	PET Tag	Aussentemperatur (Luft) Nacht	Albedo	Solar Reflectance Index (SRI)
Gebäudenahe Bodenkonstruktionen	°C	°C	–	–
B_Wiese_feucht_Bäume_Boden_org_Anteil	33.3	22.3	0.16	18
B_Wiese_feucht_Bäume_Boden_min_Anteil	33.3	22.3	0.16	18
B_Rasen_feucht_Bäume_Boden_org_Anteil	33.4	22.3	0.25	25
B_Rasen_feucht_Bäume_Boden_min_Anteil	33.4	22.3	0.25	25
B_Wiese_trocken_Bäume_Boden_org_Anteil	34.4	22.3	0.16	18
B_Rasen_trocken_Bäume_Boden_org_Anteil	34.5	22.4	0.25	25
B_Wiese_trocken_Bäume_Boden_min_Anteil	35.3	22.5	0.16	18
B_Wiese_feucht_Boden_min_Anteil	35.4	22.4	0.16	18
B_Wiese_feucht_Boden_org_Anteil	35.4	22.4	0.16	18
B_Rasen_trocken_Bäume_Boden_min_Anteil	35.4	22.5	0.25	25
B_Rasen_feucht	35.4	22.4	0.25	25
B_Rasen_feucht_Boden_min_Anteil	35.4	22.4	0.25	25
B_Rasen_feucht_Boden_org_Anteil	35.5	22.4	0.25	25
B_Wiese_trocken_Boden_org_Anteil	36.8	22.5	0.16	18
B_Rasen_trocken_Boden_org_Anteil	36.9	22.5	0.25	25
B_Asphalt_d	37.6	22.9	0.18	12
B_Betonsteinpflasterung	37.7	22.9	0.25	28
B_Wiese_trocken_Boden_min_Anteil	37.9	22.6	0.16	18
B_Betonbelag	37.9	22.9	0.38	44
B_Asphalt_h	37.9	22.9	0.33	37
B_Rasen_trocken	37.9	22.6	0.25	25
B_Rasen_trocken_Boden_min_Anteil	38.0	22.6	0.25	25
B_Steinplattenpflasterung	38.2	22.9	0.45	52
B_Rasengittersteinpflasterung	38.2	22.7	0.25	27
B_Kiesbelag	38.2	22.7	0.29	28
B_Whitetopping_auf_Asphalt	38.5	22.8	0.62	75

Dachkonstruktionen

D_Intensiv_Begrünung_feucht	33.5	21.7	0.16	18
D_Extensiv_Begrünung_feucht	33.5	21.8	0.20	19
D_Intensiv_Begrünung_trocken	33.6	21.7	0.16	18
D_Metall_h	33.6	22.3	0.68	81
D_Metall_b	33.7	22.3	0.36	25
D_Metall_d	33.7	22.4	0.08	0
D_Faserzement_h	33.7	22.4	0.75	86
D_Extensiv_Begrünung_trocken	33.7	21.8	0.20	19
D_Faserzement	33.8	22.4	0.63	63
D_Photovoltaik_Extensiv_Begrünung_feucht	33.8	22.1	0.18	10
D_Ziegel_rot	33.8	22.4	0.60	59
D_Photovoltaik	33.8	22.4	0.16	1
D_Faserzement_m	33.8	22.4	0.45	53
D_Ziegel_d	33.8	22.4	0.40	37
D_Faserzement_d	33.8	22.4	0.26	35
D_Photovoltaik_Extensiv_Begrünung_trocken	33.9	22.1	0.18	10
D_Kies	34.2	22.2	0.29	28
D_Bitumen	34.2	22.2	0.26	24

Reflexion (visuelle Eigenschaften)	Lebensdauer	Bewertung Schall- absorptionsgrad	Treibhausgas- emissionen, Total	Abflussbeiwert
–	Jahre	–	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	–
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	n. vorhanden	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	1	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	n. vorhanden	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	1	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	n. vorhanden	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	n. vorhanden	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	1	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	1	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	n. vorhanden	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	1	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	1	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	n. vorhanden	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	n. vorhanden	0.1
0.13	30	1.3	n. vorhanden	1.0
0.25	25	4.5	n. vorhanden	1.0
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	1	0.1
0.25	35	1.0	44	1.0
0.24	30	1.3	n. vorhanden	1.0
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	1	0.1
0.25	n. vorhanden	n. vorhanden	1	0.1
0.30	25	1.5	n. vorhanden	1.0
0.25	30	n. vorhanden	20	0.2
0.13	15	6.0	6	0.6
0.25	30	1.0	n. vorhanden	1.0
0.25	30	n. vorhanden	n. vorhanden	0.2
0.19	40	n. vorhanden	n. vorhanden	0.4
0.25	30	n. vorhanden	n. vorhanden	0.2
0.80	50	n. vorhanden	11	1.0
0.60	50	n. vorhanden	7	1.0
0.10	50	n. vorhanden	11	1.0
0.70	50	n. vorhanden	7	1.0
0.19	40	n. vorhanden	n. vorhanden	0.4
0.30	50	n. vorhanden	7	1.0
0.14	40	n. vorhanden	n. vorhanden	0.4
0.13	50	n. vorhanden	9	1.0
0.09	35	n. vorhanden	190	1.0
0.50	50	n. vorhanden	7	1.0
0.10	50	n. vorhanden	9	1.0
0.25	50	n. vorhanden	7	1.0
0.14	40	n. vorhanden	n. vorhanden	0.4
0.13	20	n. vorhanden	50	1.0
0.13	20	n. vorhanden	49	1.0

Abkürzungsverzeichnis

α	Albedo
b	blanke Metalloberfläche
B	Boden
D	Dach
d	d = Farbgebung dunkel bei Wänden: $\alpha = 0.26$, bei Reflektierender_Anstrich: $\alpha = 0.42$, bei Böden (Asphalt, Standard): $\alpha = 0.18$
e	Eigenfarbe
EPS	Expandiertes Polystyrol
h	Farbgebung hell bei Wänden: $\alpha = 0.75$, bei Reflektierender_Anstrich: $\alpha = 0.81$, bei Böden (Asphalt, reflektierend): $\alpha = 0.33$
HF	Hinterlüftete Fassade
LB	Glasfassade/Leichtbau
m	Farbgebung mittel bei Wänden: $\alpha = 0.45$, bei Reflektierender_Anstrich: $\alpha = 0.69$
min	mineralisch (erhöhter mineralischer Anteil)
N	Neubau
org	organisch (erhöhter organischer Anteil)
PV	Photovoltaik
PET	Physiologisch Äquivalente Temperatur
PIR	Polyiso-Hartschaum
r	reflektierend
S	Sanierung
SRI	Solar Reflectance Index
U-Wert	$W/(m^2 K)$, Wärmedurchgangskoeffizient (wird als Mass zur Beschreibung des spezifischen Wärmeverlustes von Bauteilen verwendet)
VA	Verputzte Aussendämmung
ZW	Zweischalige Wandkonstruktionen
θ_a	Aussenlufttemperatur
θ_i	Innenlufttemperatur

Konstruktionsgruppe:

ZW = Zweischalige Wandkonstruktionen

VA = Verputzte Aussendämmung

LB = Glasfassade/Leichtbau

HF = Hinterlüftete Fassade

Reflektierender Anstrich

B = Umgebung (Boden)

D = Dach



Abb. 1 Systematik für die Benennung der Materialien
(die Farben werden nur in der Abbildung verwendet und
haben keine spezielle Bedeutung).

1 Kurzeinführung

1.1 Hintergrund

Eine der greifbarsten Auswirkungen des Klimawandels auf das tägliche Leben in der Schweiz ist das zunehmende Auftreten von starkem Hitzestress im städtischen Umfeld im Sommer. Ein integraler Baustein für klimaresiliente Städte kann der Einsatz von Materialien für Fassaden, Böden im Gebäudeumfeld und Dächer sein, deren Eigenschaften zu einer Minderung der Erwärmung des städtischen Mikroklimas beitragen. Damit soll eine (unnötige) Erhöhung des Hitzestresses auf den Menschen vermieden werden. Allerdings spielt bei der Wahl von Aussenmaterialien nicht nur die Wirkung auf das Mikroklima eine Rolle, ebenso wichtig sind Aspekte wie Blendung, Akustik, Treibhausgasemissionen und Lebensdauer. Um diese Aspekte in einem frühen Planungsstadium diskutieren und bewerten zu können, müssen Entscheidungsträger und Planer auf die entsprechenden Informationen zugreifen können.

Ziel ist es, den entsprechenden Informationsbedarf mit einem Materialkatalog abzudecken. Der erarbeitete Katalog bewertet Baustoffe und Materialkombinationen für Fassaden, das nahe Gebäudeumfeld (Bodenbeläge) und Dächer auf ihre Wirkung hinsichtlich des städtischen Mikroklimas. Dabei werden zur Vereinfachung als «Material» jeweils eine Kombination aus Oberflächenmaterial, Konstruktion und Farbgebung der Oberfläche bezeichnet. Die Materialien werden im Spannungsfeld zwischen bestmöglichen Eigenschaften für einen geringen Hitzestress, bauphysikalischen und energierelevanten Anforderungen, sowie Nachhaltigkeit bewertet.

Die meisten Daten können mittels einer umfassenden Literaturstudie gewonnen werden. Um jedoch die Auswirkungen des Materials auf das Gebäudeumfeld zu untersuchen, müssen ausreichend detaillierte Modelle des Mikroklimas verwendet werden, welche die städtische Energiebilanz berücksichtigen können. Die entsprechenden Simulationen werden mit ENVI-met durchgeführt.

Randbedingungen für die Simulation

Methode: Dreidimensionales Mikroklimamodell ENVI-met für ein Areal mit Hofsituation in Basel-Stadt. Bei der Simulation wird jeweils das Material für einen Bauteiltyp (z.B. «Wand») variiert. Die anderen Bauteile, z.B. Dächer und Böden der Umgebung, haben dabei eine Referenzkonstruktion.

Simulation: Es wird eine viertägige Hitzewelle mit Wetterdaten von Basel-Binningen der ersten Augustwoche 2018 simuliert. Der vierte Tag des Wetterdatensatzes weist um 04:00 Uhr morgens eine minimale Aussenlufttemperatur (θ_a) von 21.2 °C auf und tagsüber um 14:00 Uhr eine maximale θ_a von 34.8 °C.

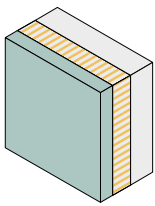
Ausgegebene Ergebnisse: Ausgewertet wird am vierten Tag für die Nacht um 04:00 Uhr die Aussenlufttemperatur (θ_a) und für den Tag um 14:00 Uhr für Fassaden und Böden die PET (physiological equivalent temperature) und für Dächer θ_a . Für die Fassaden und Böden werden zehn Standorte (Sensoren) im Areal untersucht. Die gebäudenahen Sensoren sind jeweils 1 m von den Gebäudefassaden entfernt. Es werden die Höhen von 1.7 m und 10.7 m ausgegeben, für jede Höhe werden die Ergebnisse aller zehn Standorte gemittelt. Für die Dächer werden die Ergebnisse von fünf Sensoren auf einer Höhe von 21.6 m gemittelt (1.6 m über der Dachebene).

Die Ergebnisse gelten für die im [Kapitel 6.2](#) genannte Modellordnung und die entsprechenden Randbedingungen.

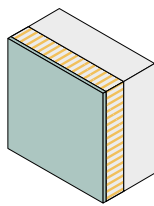
Der Materialkatalog umfasst derzeit Fassadenmaterialien, gebäudenähe Böden im Aussenbereich und Dächer ([Abb. 2](#)).

- Zweischalige Wandkonstruktionen (Abkürzung ZW_), 5 Materialien
- Verputzte Aussendämmung (Abkürzung VA_), 12 Materialien
- Glasfassade/Leichtbau (Abkürzung LB_), 6 Materialien
- Hinterlüftete Fassade (Abkürzung HF_), 11 Materialien mit einem begrünten Fassadenelement in trockenem und feuchtem Zustand
- Reflektierende Anstriche Wand, 3 Materialien
- Umgebung Boden (B_), 14 Materialien und 13 Bodenbegrünungskombinationen jeweils in trockenem und feuchtem, sowie besonntem und beschattetem Zustand
- Dach, 15 Materialien und drei Dachbegrünungstypen in trockenem und feuchtem Zustand

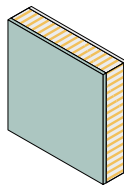
Die nachfolgenden Übersichten zeigen die untersuchten Materialien im Detail.



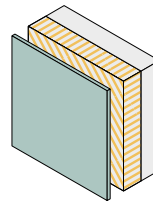
Zweischalige
Wandkonstruktion



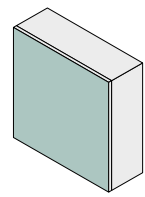
Verputzte
Aussendämmung



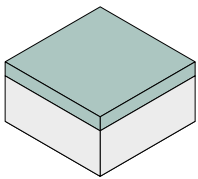
Leichtbau/
Glassfassade



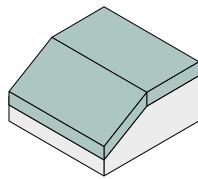
Hinterlüftete
Fassade



Reflektierender
Wandanstrich



Boden im
Gebäudeumfeld



Steildach/Flachdach

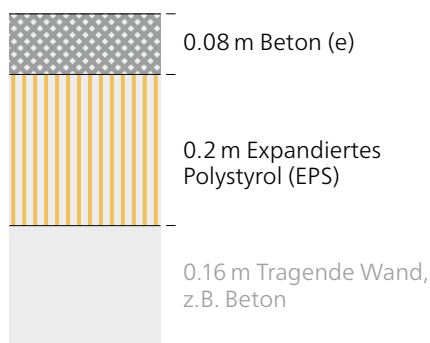
Abb. 2 Untersuchte Material-
und Konstruktionsgruppen.

Zweischalige Wandkonstruktionen

Sichtbetonwand mit Kerndämmung

→ ZW_Sichtbetonwand_

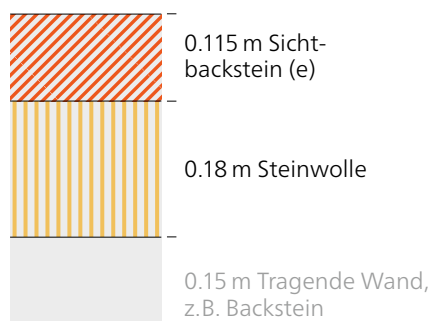
Kerndämmung



Zweischalenmauerwerk mit Kerndämmung, Sichtbackstein aussen

→ ZW_Zweischalenmauerwerk_

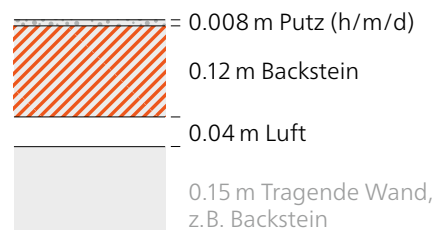
Kerndämmung



Zweischalenmauerwerk verputzt

→ ZW_Zweischalenmauerwerk_

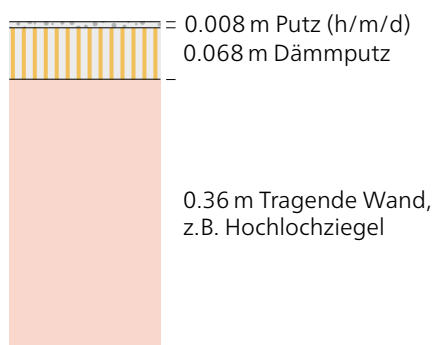
Luftschicht



Verputzte Aussendämmung

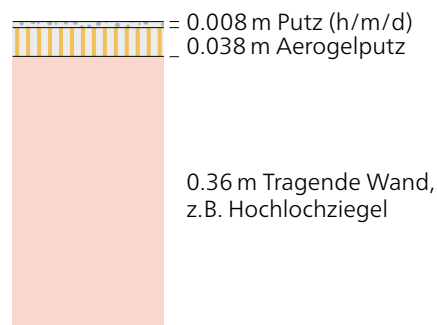
Einschalenbacksteinmauerwerk mit 7 cm Dämmputz

→ VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Dämmputz



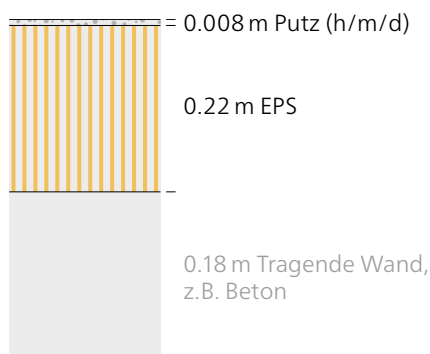
Einschalenbacksteinmauerwerk mit 4 cm Aerogeldämmputz

→ VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz



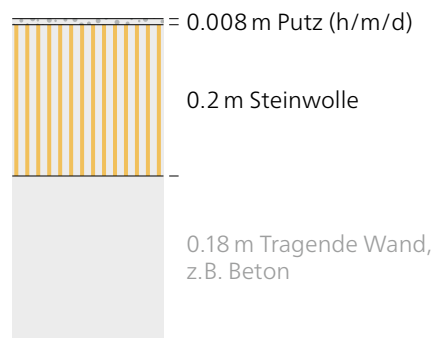
Kompaktfassade (EPS)

→ VA_Kompaktfassade_EPS



Kompaktfassade (Steinwolle)

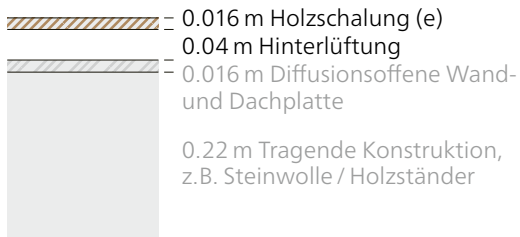
→ VA_Kompaktfassade_Steinwolle



Hinterlüftete Fassade

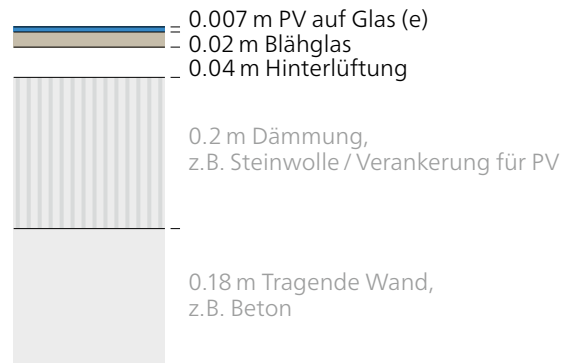
Holzverkleidung vor Holzständerwand mit Aussenwärmedämmung

→ HF_Holzverkleidung



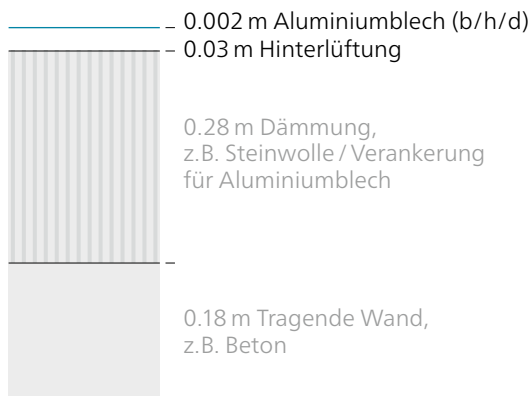
PV (hinterlüftet, Dämmung Steinwolle)

→ HF_Photovoltaik



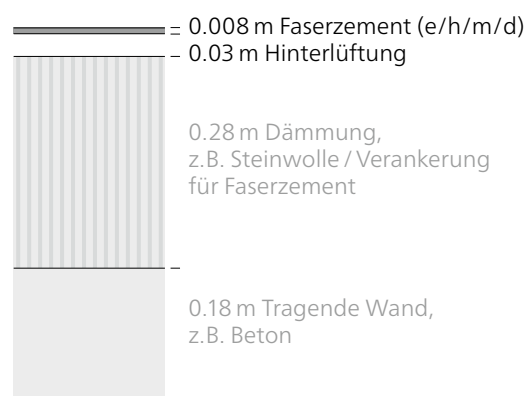
Metallblechverkleidung

→ HF_Metallblechverkleidung



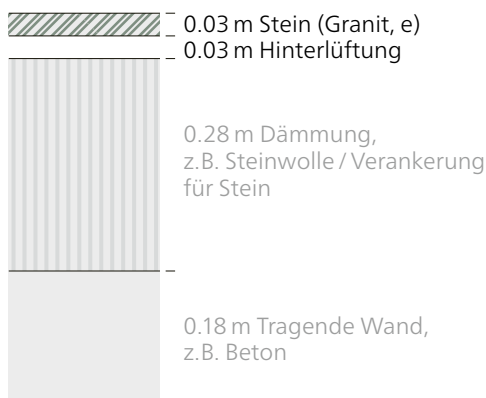
Faserzementverkleidung, Eternit

→ HF_Faserzementverkleidung



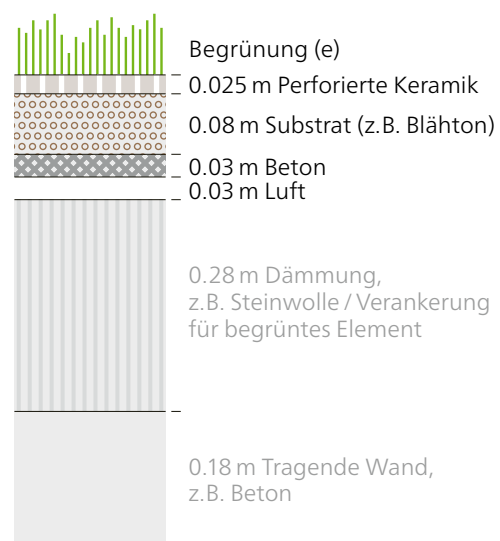
Kunststein / Natursteinverkleidung

→ HF_Steinverkleidung



Vorgehängtes Begrünungselement

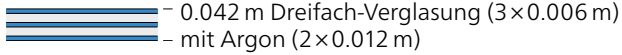
→ HF_Begrünungselement



Glasfassade/Leichtbau

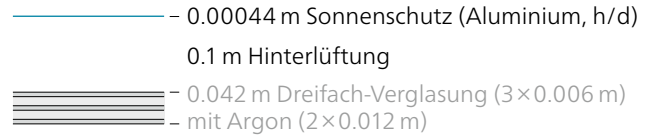
Glasfassade (g-Wert 0.3)

→ LB_Glasfassade



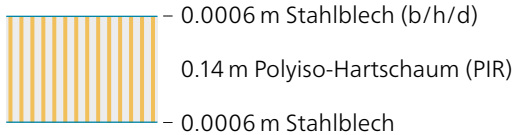
Glasfassade mit Rafflamellenstore (geschlossen)

→ LB_Glasfassade_Sonnenschutz



Sandwichpaneel (Leichtbaufassade Gewerbe-, Industriebau)

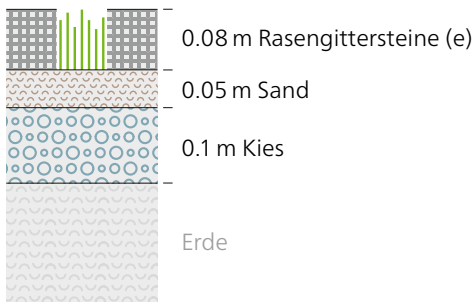
→ LB_Sandwichpaneel



Umgebung (Boden)

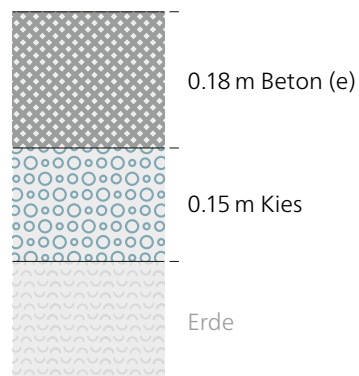
Rasengittersteinpflasterung für Wege/ befahrbar Flächen

→ B_Rasengittersteinpflasterung



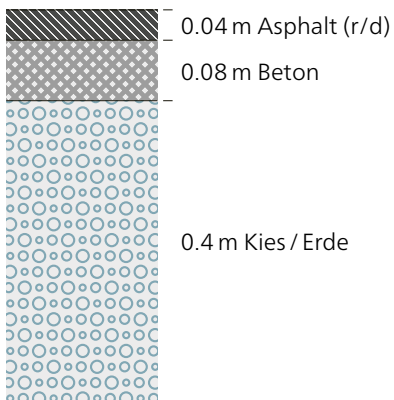
Betonbelag

→ B_Betonbelag



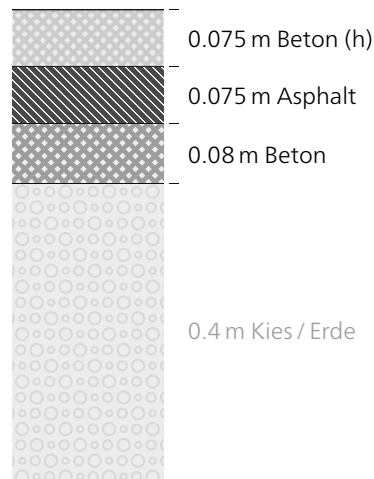
Schwarzelbelag (Asphalt)

→ B_Asphalt



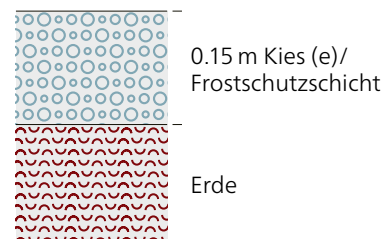
Whitetopping auf Asphalt

→ B_Whitetopping_auf_Asphalt



Kiesbelag

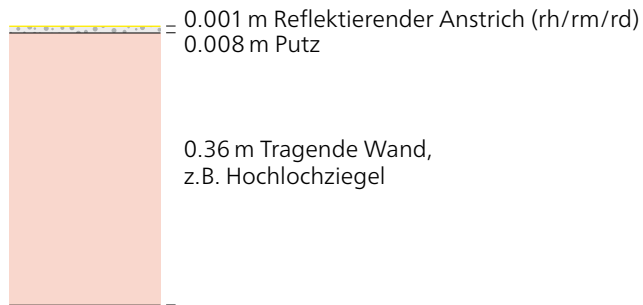
→ B_Kiesbelag



Anstriche Wand

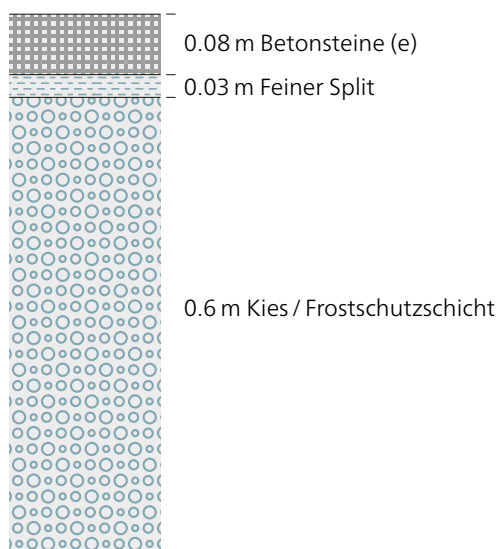
Reflektierender Anstrich auf Putz und Einschalenmauerwerk

→ Reflektierender_Anstrich



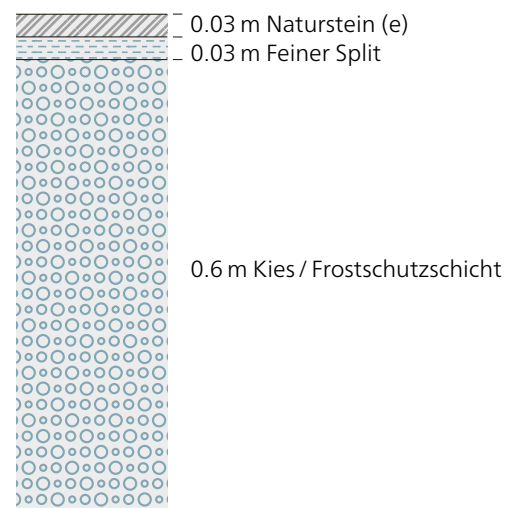
Betonsteinpflasterung für Wege, befahrbar

→ B_Betonsteinpflasterung



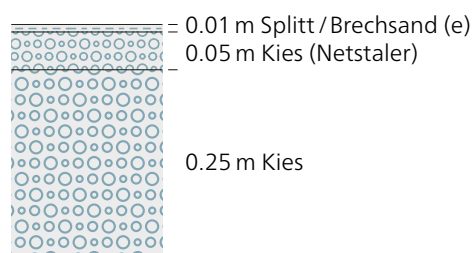
Steinplattenpflasterung für Wege

→ B_Steinplattenpflasterung



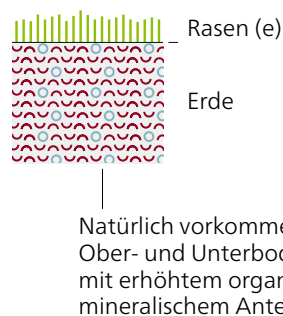
Chaussierung (wassergebundene Deckschicht)

→ B_Chaussierung



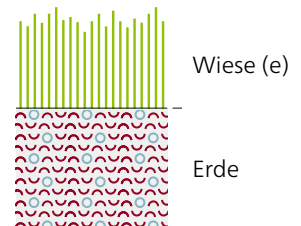
Rasen

→ B_Rasen



Wiese

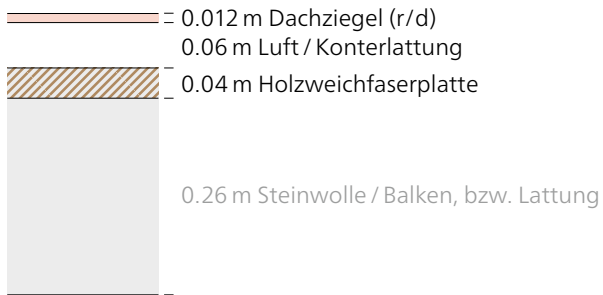
→ B_Wiese



Dächer

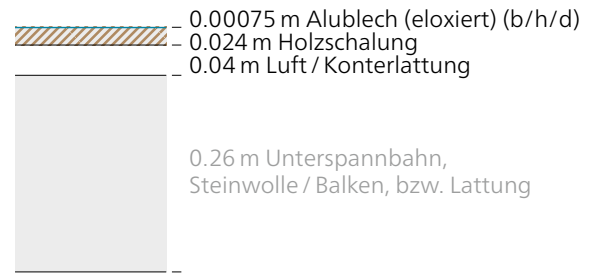
Dachkonstruktion belüftet mit Ziegelddeckung

→ D_Ziegel



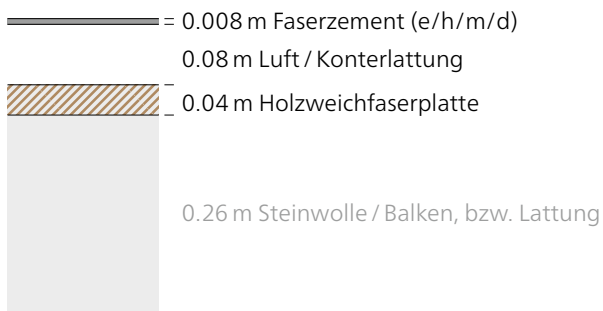
Dachkonstruktion belüftet mit Metalldeckung

→ D_Metall



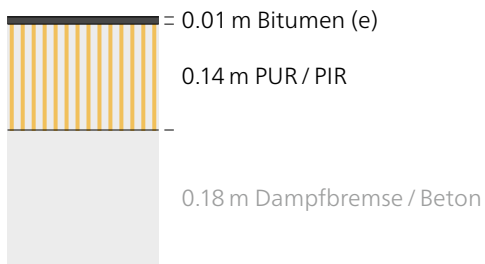
Dachkonstruktion belüftet mit Faserzementdeckung

→ D_Faserzement



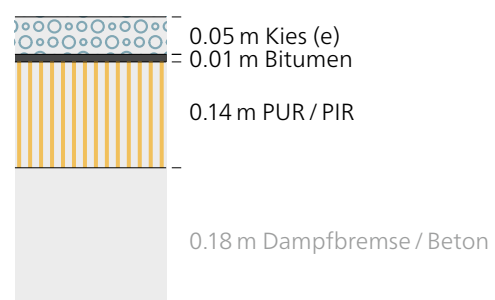
Dachkonstruktion ohne Schutz- und Nutzschichten

→ D_Bitumen

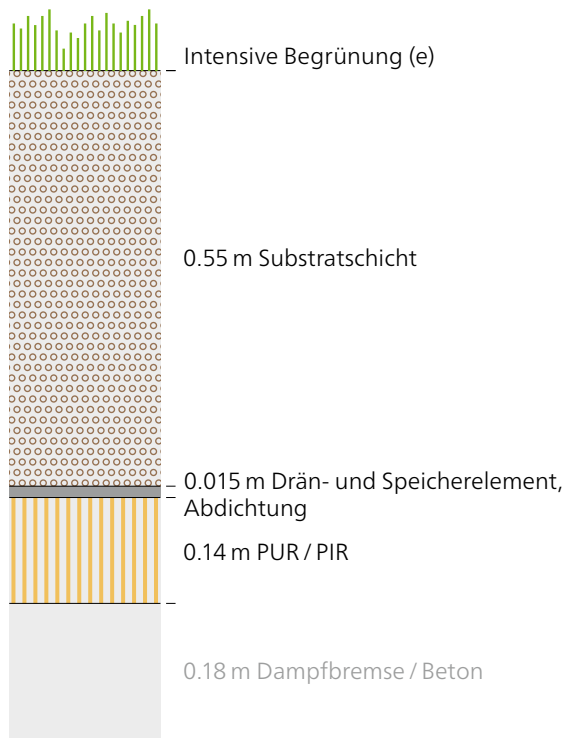


Dachkonstruktion bekies

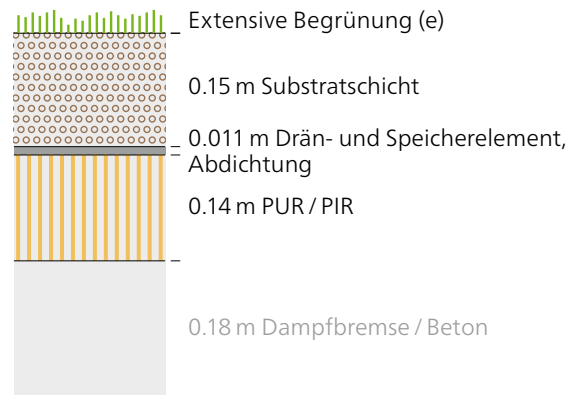
→ D_Kies



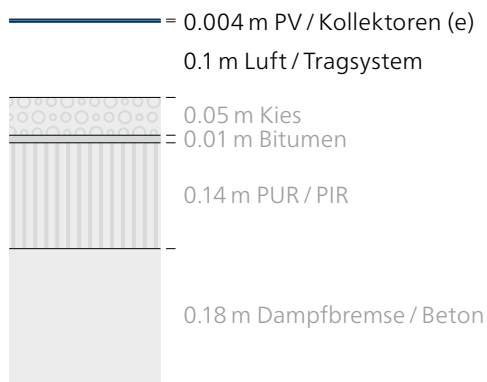
**Dachkonstruktion
mit Intensivbegrünung**
→ D_Intensiv_Begrünung



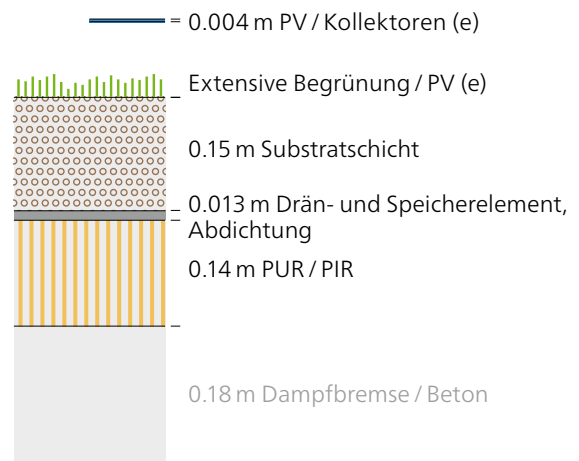
**Dachkonstruktion
mit Extensivbegrünung**
→ D_Extensiv_Begrünung



**Dachkonstruktion vollflächig
mit PV/Kollektoren**
→ D_Photovoltaik



**Dachkonstruktion 50% PV/Kollektoren,
50% Extensivbegrünung**
→ D_Photovoltaik_Extensiv_Begrünung



Die einzelnen Materialien können aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden: zunächst über eine Datensammlung von 35 Kenngrößen zum Material selbst. Da diese Anzahl für einen Vergleich unübersichtlich ist, werden einige charakteristische Parameter herausgegriffen und bewertet. Damit ist ein Vergleich der Materialien untereinander auf zwei Arten möglich: Zum einen gezielt für einen Parameter (z.B. Albedo), oder aber für alle Parameter zusammen. Bei der Gesamtbewertung werden die Materialeigenschaften bewertet und dann alle Bewertungen addiert, sodass Materialien mit einer hohen Bewertung über viele günstige Eigenschaften verfügen. Fehlen zu Materialien Daten wird in der Gesamtbewertung das Potential des Materials aufgezeigt, wenn es bei allen fehlenden Parametern die Bestbewertung hätte. Das Vorgehen bei der Erstellung des Materialkatalogs und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten bei der Bewertung der Materialien ist in **Abb.3** dargestellt.

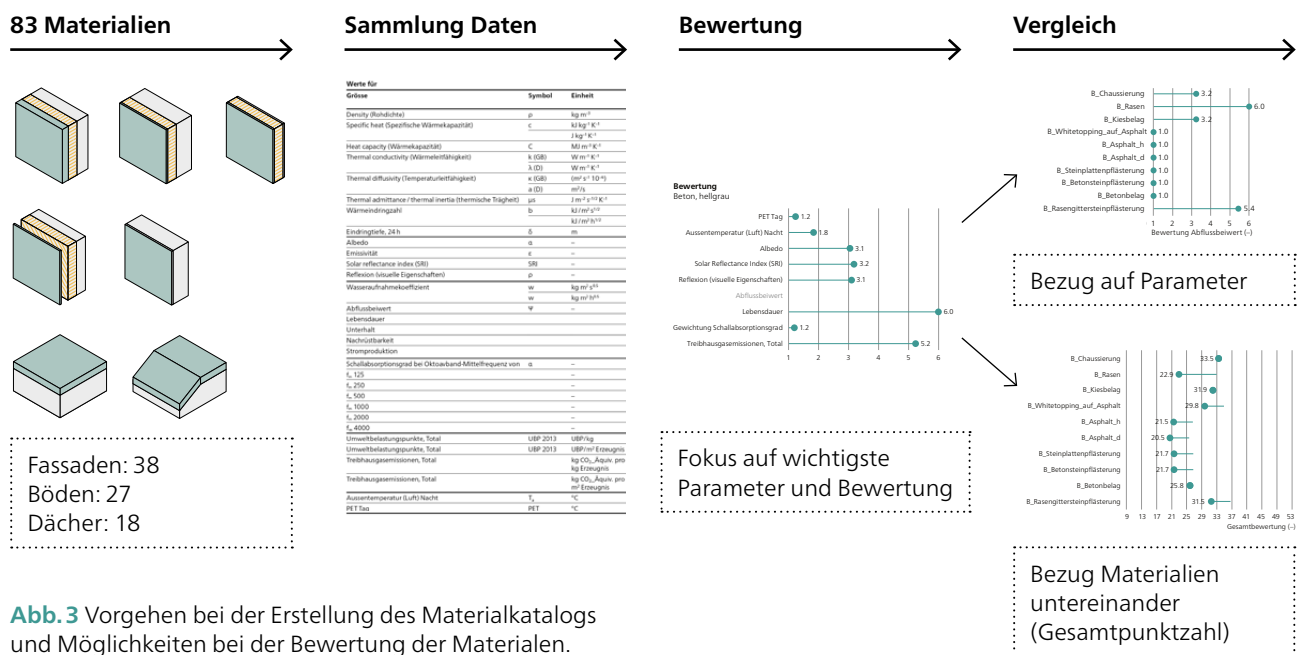


Abb.3 Vorgehen bei der Erstellung des Materialkatalogs und Möglichkeiten bei der Bewertung der Materialien. Der Vergleich der Materialien kann mit absoluten Zahlen oder mit den Bewertungen erfolgen.

Der Katalog zielt auf eine Verwendung in einem sehr frühen, noch konzeptionellen Planungsstadium ab. In seinem Aufbau soll er unterschiedliche Fragestellungen innerhalb dieser frühen Phase abdecken.

Tabelle 1 zeigt einige dieser möglichen Fragestellungen auf und gibt das jeweilige Kapitel an, in dem sich die gewünschten Informationen finden lassen. Dabei sind die Kapitel, welche sich auf den eigentlichen Materialkatalog beziehen, hellblau hinterlegt. Methodische Kapitel und Abschnitte, die Hintergrundinformationen enthalten, sind hellgrau eingefärbt.

Fragestellungen (Beispiel)	Kapitel und Inhalt
– Optimierung einzelne Parameter – Gesucht ist z.B. ein Material mit geringen Treibhausgasemissionen für Herstellung und Entsorgung oder ein Material mit tiefer Albedo	3 Ergebnisse für zentrale Parameter Vergleich aller Materialien hinsichtlich eines bestimmten Parameters (z.B. Treibhausgasemissionen, Albedo). Die vergleichende Bewertung erfolgt jeweils innerhalb der Gruppe Fassaden-, Boden oder Dachmaterial.
– Welches Material wird in möglichst vielen Kategorien gut bewertet? – Welches Material ist bei einem gegebenen Konstruktionstyp (z.B. vorgehängte Fassade/Dämmputz) besonders geeignet? – Welche Farbe ist bei einem gegebenen Material günstig?	2 Gesamtbewertung über alle Parameter Jedes Material wird in neun (Böden), bzw. acht (Wände, Dächer) Kategorien bewertet. Diese Bewertungen lassen sich für alle Materialien vergleichen, oder es kann innerhalb eines Konstruktionstyps verglichen werden (z.B. vorgehängte Fassade/Dämmputz).
– Angabe zu einem Materialparameter – Detailfrage zu einem Material – Datenquelle für einen bestimmten Parameter	4 Datensammlung Hier wird für jedes Material ein möglicher Konstruktionsaufbau dargestellt. Weiter werden Materialdaten für die wichtigsten Parameter als absolute Werte sowie als Bewertung innerhalb der Gruppe Fassaden- oder Bodenmaterial angegeben. Zusätzlich gibt es Angaben für 35 material-spezifische Parameter, sowie die entsprechenden Quellenangaben.
– Wie war das Vorgehen? – Wie wurden die Materialien ausgesucht? – Welche Größen werden berücksichtigt? – Wie sind die Größen definiert? – Wie wird mit den Materialien als Teil einer Konstruktion umgegangen? – Welche U-Werte haben die Konstruktionen? – Wurde ein Plausibilitätscheck für die Daten gemacht?	5 Anhang 1: Methodik Materialkatalog Informationen zur Vorgehensweise bei der Erstellung des Materialkatalogs
– Hintergrundinformationen zu den Simulationen – Warum wurden die Simulationen mit ENVI-met gemacht? – Welches Klima liegt den Simulationen zu Grunde? – Sind alle Ergebnisse plausibel?	6 Anhang 2: Methodik und kritische Diskussion der Simulationen – Auswahlkriterien für das Simulationsprogramm – Randbedingen für die Simulationen – Kritische Diskussion und Validierung der Simulationsergebnisse
– Quellenangaben für Kapitel 1, 2, 3, 5 und 6	7 Anhang 3: Literatur Literaturverzeichnis

Tab. 1 Mögliche Fragestellungen und Aufbau des Materialkatalogs.

1.2 Aufbau Materialkatalog

Der Materialkatalog gliedert sich in drei Teile:

- Ergebniserläuterung für zentrale Materialeigenschaften und Gesamtbewertung
- Datensammlung
- Methodische Erläuterungen

Folgende Themen sind für das Verständnis des Katalogs wichtig:

- Städte weisen durch ihre dreidimensionale Gestalt eine deutliche Oberflächenvergrößerung auf und unterscheiden sich durch Versiegelung und den Einsatz einer hohen Materialdichte deutlich vom Umland. Eine Folge davon ist der Lufttemperaturunterschied zwischen städtischen und ländlichen Gebieten. Die im Mittel höheren Aussenlufttemperaturen in Städten werden als städtischer Wärmeinseleffekt bezeichnet. Der thermische Komfort ist Teil des Stadtklimas und berücksichtigt alle diesbezüglich für den Menschen relevanten klimatischen und physiologischen Parameter. Der thermische Komfort kann mit der Grösse «physiologisch äquivalente Temperatur (PET)» quantifiziert werden. Mit dieser Grösse wird beschrieben, ob und wenn ja wie stark Menschen Hitzestress empfinden. Selbst wenn sich der Fokus bei der Materialwahl auf die Verbesserung des Mikroklimas richtet, ist die Auswahl geeigneter Materialien nicht immer eindeutig. So bewirken beispielsweise helle Bodenoberflächen durch ihren hohen Reflexionsgrad zwar tiefere Aussenlufttemperaturen und können somit den städtischen Wärmeinseleffekt reduzieren. Durch den Anteil der reflektierten Strahlung, der bei hellen Oberflächen höher ist als bei dunklen, könne sie tagsüber jedoch den visuellen und den thermischen Komfort negativ beeinflussen. Der Materialkatalog fokussiert auf den thermischen Komfort, Angaben zur resultierenden Aussenlufttemperatur für Fassaden und Böden finden sich in den [Kapiteln 6.4.1](#) und [6.4.2](#).
- Farben: Für Materialien, die eine unterschiedliche Farbgebung der Oberfläche haben können, werden jeweils drei Farbtöne berücksichtigt (hell, mittel, dunkel).
- Alterung und Verschmutzung Materialien: Im Katalog wird eine Veränderung von Eigenschaften infolge der Alterung, durch das Verschmutzen oder das Ausbleichen von Materialien nicht berücksichtigt. Speziell bei reflektierenden Anstrichen/Asphalt sind Alterung und Verschmutzung ein Thema. Derzeit ist den Verfassern keine Norm bekannt, die Testverfahren für eine frühzeitige Alterung für reflektierende Anstriche/Asphalt berücksichtigt, um daraus verlässliche Aussagen zum Langzeitverhalten ableiten zu können. Als sehr grobe Näherung für einen möglichen Alterungsprozess, bzw. für Verschmutzung kann betrachtet werden, wie sich das Mikroklima verändert, wenn für Materialien unterschiedliche Farbtöne berechnet wurden. Ein Sprung zwischen den drei Farbkategorien (hell, mittel und dunkel) kann eine Zunahme der PET (Definition siehe [Tabelle 2](#)) zwischen 0.0 und 0.8 K bewirken. Umgekehrt gilt dies auch für ein mögliches Ausbleichen der Materialien (Abnahme PET).

- Begrünung (Boden, Dach und Fassade): Grundsätzlich gilt die Prämisse, dass eine bewässerte (und möglichst verschattete) Begrünung wesentlich zu einem vorteilhaften Mikroklima beiträgt. Die Begrünungen werden in trockenem und feuchtem Zustand betrachtet. In trockenem Zustand wird vom schlechtesten Fall ausgegangen: simuliert wird das Ende einer Hitzeperiode bei ausbleibender Bewässerung und ausgetrockneter Begrünung. Dieser Zustand ist derzeit für durchschnittliche Sommer nicht immer repräsentativ, allerdings ist bei Hitzesommern anzunehmen, dass regionale Bewässerungsverbote ausgesprochen werden können, wie dies z.B. in einzelnen Gemeinden im Kanton Basel-Landschaft 2001, 2003 und 2018 [1] und im Aargau im Jahr 2018 erfolgte [2]. Im Sommer 2022 erliessen 18 Kantone Aufrufe an die Bevölkerung zum Wassersparen und teilweise Nutzungsbeschränkungen [3]. Die begrünten Fassaden und die Dachflächen sind auch nicht explizit verschattet (z.B. durch Bäume etc.). Für weitere Informationen, siehe auch [«Infobox: begrünte Fassade»](#) und [«Infobox: Trockene Grünflächen und Dachbegrünungen»](#). In feuchtem Zustand wird von einer Bewässerung ausgegangen, sodass die Pflanzen über ausreichend Wasser verfügen und damit auch eine Verdunstung (Evapotranspiration) stattfindet.
- Bei den Grünflächen mit Rasen und Wiese wird davon ausgegangen, dass der natürlich vorhandene Boden vor Ort erhalten bleibt. Terrainveränderungen stören den natürlichen Bodenaufbau und sind nicht Gegenstand des Materialkatalogs. Aus ökologischer Sicht ist der Erhalt des natürlich vorhandenen Bodens anzustreben. Um die Spannweite der natürlich vorhandenen Bodentypen in der Schweiz abzubilden, werden ein leichter Boden mit erhöhtem organischem Anteil, sowie ein schwerer Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil untersucht. Weitere Information zu Bodenarten siehe [«Infobox: Böden für Grünflächen»](#).

1.2.1 Ergebnisse für zentrale Parameter

Die verwendeten acht Parameter für Wände und Dächer, sowie die neun Parameter für Böden sind in [Tabelle 2](#) aufgelistet und definiert.

Für alle Materialien wird in Grafiken dargestellt, welche Absolutwerte die Materialien für den jeweiligen Parameter aufweisen und wie dieser Parameter relativ bewertet wird. Die Bewertung der Parameter erfolgt auf einer Skala (6 = sehr gut, 1 = ungenügend). Die Materialien werden jeweils innerhalb der Gruppe Fassadenmaterial oder Boden verglichen. Das innerhalb dieser Gruppe beste Material wird am höchsten bewertet, das innerhalb der Gruppe schlechteste Material am tiefsten. Bei sehr geringen Unterschieden, wie z.B. bei der Wirkung der Bodenmaterialien auf das Mikroklima nachts, misst diese Art der Bewertung geringen Differenzen ein hohes Gewicht zu. Weitere Angaben finden sich in [Kapitel 5.1.5](#).

	Parameter	Definition	Auswirkung
F/B	PET Tag	Die «Physiologisch Äquivalente Temperatur» berücksichtigt alle für den thermischen Komfort des Menschen relevanten Parameter. Dies schliesst umgebungsklimatische Grössen, wie Einstrahlung, Lufttemperatur, Wind und Feuchte, sowie körperliche Parameter (physische Aktivität, inklusive Schwitzen und Bekleidungsgrad) ein. Ausgabe: PET um 14:00 Uhr auf 1.7 m Höhe	> 41 °C: Extreme Wärmebelastung 35–41 °C: Starke Wärmebelastung 29–35 °C: Mässige Wärmebelastung 23–29 °C: Schwache Wärmebelastung 18–23 °C: Keine Belastung
D	Aussenlufttemperatur (θ_a) (Luft) Tag	Ausgabe: Lufttemperatur um 14:00 Uhr auf 1.6 m Höhe über der Dachoberfläche	Eine hohe Lufttemperatur über dem Dach verstärkt den Wärmeinseleffekt.
F/B/D	Aussentemperatur (θ_a) (Luft) Nacht	Ausgabe: Lufttemperatur um 04:00 Uhr auf 1.7 m Höhe	Eine hohe Lufttemperatur verhindert eine nächtliche Auskühlung der Gebäude. Zudem regeneriert sich der menschliche Körper bei hohen Temperaturen nachts schlechter.
F/B/D	Albedo	Mass für das Rückstrahlvermögen (Reflexionsstrahlung) von nicht selber leuchtenden, diffus reflektierenden (nicht spiegelnden) Oberflächen.	Bei einer hohen Albedo wird ein Grossteil der Strahlung reflektiert. Vergleichswerte: Frischer Schnee: 0.8–0.9, neuer Asphalt: 0.05
F/B/D	Solar Reflectance Index (SRI)	Mit dem Index können die Effekte von solarer Reflexion und thermischer Emissivität kombiniert betrachtet werden. Je höher der SRI-Wert ist, desto höher ist im Allgemeinen die solare Strahlungsreflexion und desto geringer ist die solare Strahlungsabsorption.	Je höher der SRI-Wert ist, desto geringer ist die Erwärmung der Oberfläche infolge solarer Strahlung. Vergleichswerte: Weisse Oberfläche: SRI 100, Schwarze Oberfläche: SRI 0
F/B/D	Reflexion (visuelle Eigenschaften)	Der Reflexionsgrad besagt, wie gross der reflektierte Anteil einfallender Strahlung im sichtbaren Lichtspektrum ist.	Ein hoher Reflexionsgrad kann Blendung hervorrufen. Vergleichswerte: Weisse Decke: bis 85%, schwarzer Fussboden: 2%
F/B/D	Lebensdauer	Angabe der durchschnittlichen Lebensdauer eines Bauteils.	Eine lange Lebensdauer kann Ressourcen sparen, da ein Ersatz erst später notwendig wird.
F/B	Gewichtung Schallabsorptionsgrad	Als Schallabsorptionsgrad wird das Verhältnis von absorbierter zu auffallender Schallenergie definiert. Die verwendete Gewichtung berücksichtigt die Nachhallzeit und die frequenzabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs.	Ein hoher Wert weist auf hohe Emissionen bei Herstellung und Entsorgung hin.
F/B/D	Treibhausgasemissionen, Total	Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Entsorgung.	Ein hoher Wert weist auf hohe Emissionen bei Herstellung und Entsorgung hin.
B/D	Abflussbeiwert, Ψ	Dieser Parameter beschreibt den Teil eines Niederschlagsereignisses, der direkt zum Abfluss gelangt im Verhältnis zum Gesamtniederschlag. Der Parameter gilt nur für Bodenmaterialien.	Ein tiefer Abflussbeiwert weist auf eine gute Versickerung hin. Vergleichswerte: $\Psi = 1.0$: Hartbelag, $\Psi = 0.2$: Rasengittersteine

Tab. 2 Parameter für die Bewertung im Materialkatalog.
Die Bewertung von Fassadenmaterialien (F) und Dächern (D) kann für acht, diejenige von Böden (B) für neun Parameter erfolgen.

1.2.2 Gesamtbewertung über alle Parameter

Grundsätzlich wird bei dieser Gesamtbewertung nach einem Material gesucht, das möglichst viele vorteilhafte Eigenschaften aufweist. Das Material stellt damit (meistens) einen Kompromiss dar.

Aus den Bewertungen für jeden der acht (Wände, Dächer) bzw. neun (Böden) Parameter gemäss [Tabelle 2](#) und [Kapitel 1.2.1](#) kann für jedes Material eine Gesamtbewertung erfolgen. Hierbei werden die Bewertungen (Punkte) aus jedem bewerteten Bereich addiert. Es erfolgt keine Gewichtung der einzelnen Parameter. Nachteilig an diesem Vorgehen ist, dass die resultierende Bewertung stark vom besten und vom schlechtesten Material pro Parameter abhängt und dass die Bewertung nicht von der Grösse der Differenzen abhängig ist (z.B. hätte man bei ähnlichen Werten, wie z.B. bei der Wirkung der nichtgrünen Bodenmaterialien auf das Mikroklima nachts, alle Materialien einheitlich bewerten können). Vorteil der Methode ist, dass die Gesamtbewertung einfach und konsequent gehalten ist. In der Gesamtbewertung liegt der mögliche Punktwert damit bei 8–48 für Wände und 9–54 für Böden. Parameter mit fehlenden Angaben werden hierbei mit «1» bewertet. [Abb. 4](#) zeigt dies exemplarisch für neun Materialien. Materialien mit einer insgesamt hohen Punktzahl haben in mehreren Bereichen eine gute Bewertung erhalten, verfügen also über vorteilhafte Eigenschaften. In [Abb. 4](#) ist dies die zweischalige Wandkonstruktion aus Backstein mit Kerndämmung (ZW_Zweischalenmauerwerk_Kerndämmung).

Umgang mit fehlenden Parametern (Potentialabschätzung)

Da bei einigen Materialien nicht für alle Parameter Angaben existieren, sind die Gesamtbewertungen mit einer Potentialabschätzung versehen. Sie zeigt an, wie hoch die Bewertung wäre, wenn bei den fehlenden Parametern jeweils die maximale Bewertung «6» erreicht würde. In der Gesamtbewertung wird davon ausgegangen, dass beim fehlenden Parameter nur die minimale Bewertung «1» erreicht wird. In [Abb. 4](#) fehlen zum Beispiel beim reflektierenden Anstrich («Reflektierender_Anstrich_m») Angaben zu zwei Parametern. Damit liegt die Gesamtbewertung bei 23.1 Punkten, da bei beiden fehlenden Parametern im Minimum die Bewertung 1 erreicht wird. Die Potentialabschätzung zeigt, wo der Wert liegen könnte, wenn die Bewertung höher wäre, im Maximum bei beiden Parametern bei 6 (also 23.1 Punkte + 2 × 5 Punkte = 32.1 Punkte). Die Linie ist durchgezogen, da die fehlenden Werte auch tiefer bewertet sein könnten (z.B. mit 3 Punkten).

Wände

(8 Parameter, Min: 8, Max: 48)

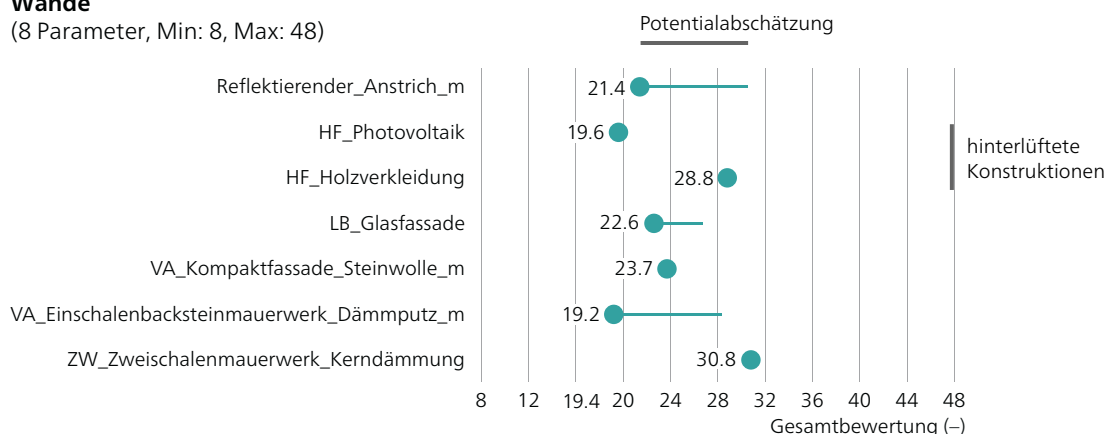


Abb. 4 Beispiel Gesamtbewertung für unterschiedliche Materialien und Interpretationshilfen am Beispiel für Wände. Bei den Wänden werden acht Parameter verglichen und mit Punkten bewertet. Vergleich der Treibhausgasemissionen: bei den Wänden sind die Konstruktionen «HF_Holzverkleidung» und «HF_Photovoltaiik» bevorzugt, da bei diesen hinterlüfteten Konstruktionen nur die äusserste, an das Aussenklima angekoppelte Schicht, gewertet wird (siehe [Kapitel 5.1.2](#)). Bei den anderen Konstruktionen gehen die Schichten von aussen bis und mit Dämmung ein. Potentialabschätzung (durchgezogene Linie hinter dem Wertpunkt): siehe [«Infobox: Umgang mit fehlenden Parametern \(Potentialabschätzung\)»](#).

1.2.3 Datensammlung

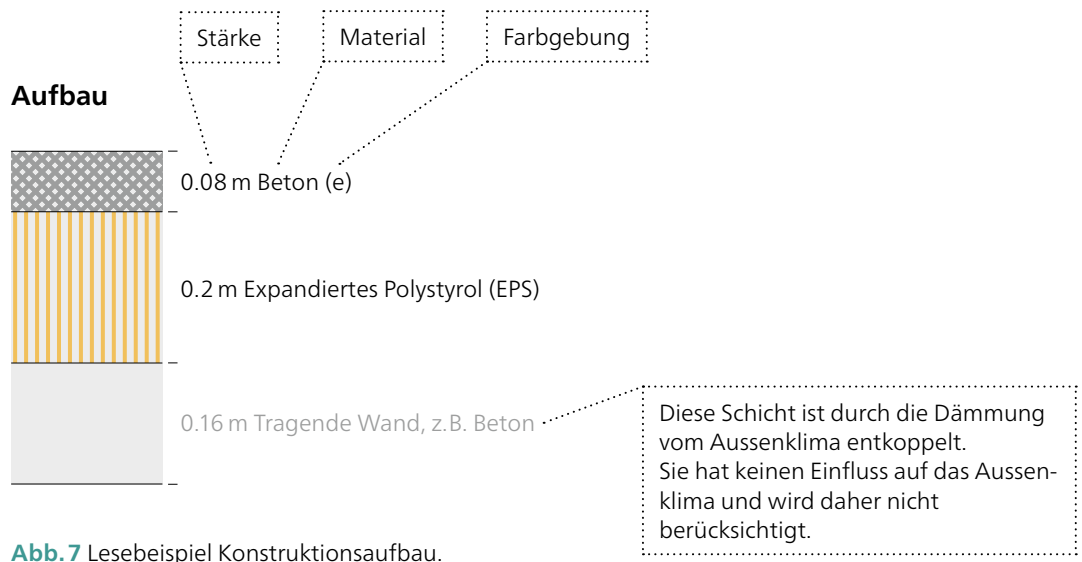
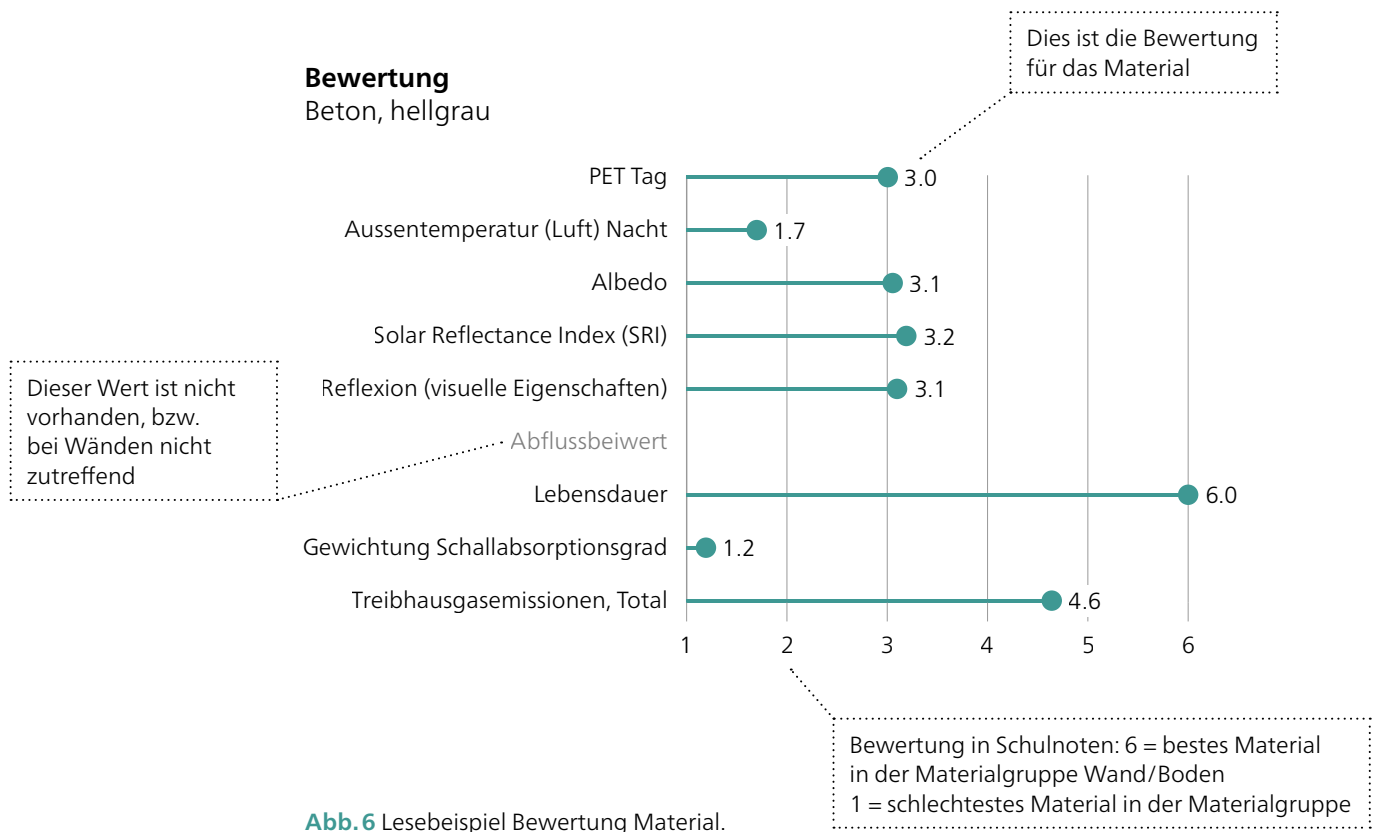
Sofern verfügbar enthält der Katalog für jedes Material Angaben zur Auswirkung auf das städtische Mikroklima, zu wärmetechnischen und strahlungstechnischen Grössen, zur Versickerungsfähigkeit, zur Nachhaltigkeit und zu akustischen Eigenschaften (Abb. 5).

Werte für

Grösse	Symbol	Einheit	Material Kennwert	
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}		
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$		
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$		
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB) λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$		Wärmetechnische Grössen
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB) a (D)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$ m^2/s		
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$		
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$ $\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$		
Eindringtiefe, 24 h	δ	m		
Albedo	α	–		Strahlungstechnische Grössen
Emissivität	ε	–		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$ $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$		Diverse Grössen: Abflussbeiwert, Lebensdauer, Unterhalt
Abflussbeiwert	ψ	–		
Lebensdauer	a			
Unterhalt		ja/nein		
Nachrüstbarkeit		ja/nein		
Stromproduktion		ja/nein		
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–		Akustik
f_m 125		–		
f_m 250		–		
f_m 500		–		
f_m 1000		–		
f_m 2000		–		
f_m 4000		–		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg		Herstellungsenergie
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis		
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C		Auswirkung städtisches Mikroklima
PET Tag	PET	°C		

Abb. 5 Aufbau detaillierte Datensammlung.

In der Datensammlung wird für die Wertung der Informationsverfügbarkeit eine farbliche Kennzeichnung verwendet. Diese ist in [Tabelle 3](#) dargestellt. Die Bewertung für alle Parameter wird wie in [Abb. 6](#) dargestellt angegeben. Für einige Parameter, z.B. für die Auswirkung auf das Mikroklima, ist der weitere Schichtaufbau der Konstruktion relevant. In diesen Fällen werden die Schichten von aussen bis und mit Dämmschicht berücksichtigt ([Abb. 7](#)). Die gezeigten Konstruktionsaufbauten und Schichtdicken sind damit zwar die Grundlage für den Materialkatalog, grundsätzlich aber im Sinne eines Vorschlages zu verstehen. Für die Benennung der Materialien im Katalog wird die Systematik in [Abb. 1 \(Abkürzungsverzeichnis\)](#) verwendet.



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien		
			Reflektierender Anstrich		
			hell	mittel	dunkel
			Kennwert	Kennwert	Kennwert
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'050		
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.50		
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'500		
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.58		
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$			
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.20		
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$			
	a (D)	m^2/s	1.3E-07		
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	561		
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.56		
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.03		
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.059		
Albedo	α	–	0.81	0.69	0.42
Emissivität	ϵ	–	0.89	0.89	0.87
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	100.0	83	50
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.70	0.50	0.25
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.		
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	0.20		
Abflussbeiwert	ψ	–	n.a.		
Lebensdauer	a	–	n.a.		
Unterhalt			ja		
Nachrüstbarkeit			ja		
Stromproduktion			nein		
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–			
f_m 125		–	0.02		
f_m 250		–	0.02		
f_m 500		–	0.03		
f_m 1000		–	0.04		
f_m 2000		–	0.05		
f_m 4000		–	0.05		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!		
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.3	22.3	22.4
PET Tag	PET	°C	40.3	39.5	38.1

Tab. 3 Farbliche Kennzeichnung für Informationsverfügbarkeit in der Datensammlung.

Information aus Materialdatenbank:

erhältlich für sehr ähnliches Material

erhältlich für Materialgruppe

Information aus Herstellerunterlagen:

für das gesuchte oder ein sehr ähnliches Produkt ersichtlich

«n.a.»:

kann zwei Bedeutungen haben:

not applicable

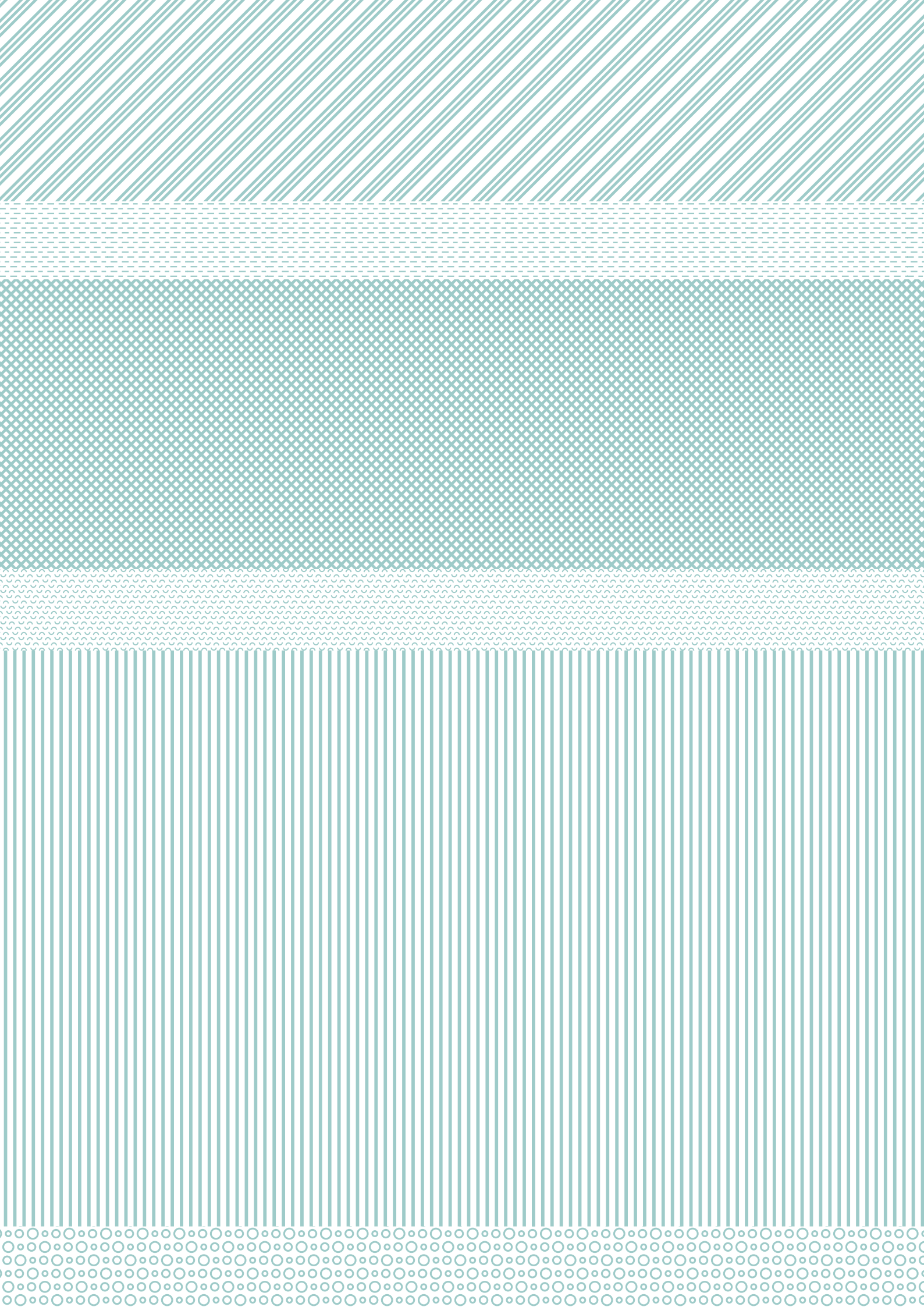
Nicht anwenbar. Beispiel: der Abflussbeiwert gilt für Böden und ist bei Wänden nicht anwendbar.

not available

Keine Information erhältlich. Beispiel: Angaben zur Lebensdauer sind nicht erhältlich.

«#WERT!»:

der Inhalt der Zelle wird berechnet, es fehlt jedoch mindestens ein nötiger Wert für die vorgesehene Berechnung.



2 Ergebnisse für zentrale Parameter

2.1 Städtisches Mikroklima

2.1.1 Resultate Tag (PET, bzw. θ_a) und Nacht (Aussentemperatur, θ_a)

Das Mikroklima tagsüber wird für Fassaden und Böden durch die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) und für Dächer durch die Aussenlufttemperatur (θ_a) beschrieben. Nachts wird für alle Bauteile θ_a ausgewertet. Dabei berücksichtigt die PET alle für den thermischen Komfort des Menschen relevanten Parameter. Dies schliesst umgebungsklimatische Größen, wie Einstrahlung, Aussentemperatur, Wind und Feuchte, sowie körperliche Parameter (physische Aktivität, inklusive Schwitzen und Bekleidungsgrad) ein. Weil Dächer in der Regel nicht zum Aufenthalt von Menschen gedacht sind, wird über Dachflächen nur θ_a ausgewertet (siehe [Infobox](#)). Da nachts die Einstrahlung entfällt, ist zur Beschreibung des thermischen Komforts θ_a eine gute Näherung. Aussagen zu den Auswirkungen der Materialien auf das Mikroklima können anhand von Simulationen gemacht werden. Die Ergebnisse gelten damit für bestimmte Randbedingungen und eine definierte Modellanordnung. Diese werden in [Kapitel 6.2](#) beschrieben. Eine kritische Diskussion und Validierung der Simulationsergebnisse finden sich in [Kapitel 6.4](#). [Abb. 8](#) und [Abb. 10](#) zeigen die PET um 14:00 Uhr für die Fassaden- und die Bodenmaterialien und [Abb. 12](#) zeigt θ_a für die Dachmaterialien. [Abb. 14](#), [Abb. 16](#) und [Abb. 18](#) zeigen die Aussenlufttemperatur um 04:00 Uhr morgens für die Fassaden-, Boden- und Dachmaterialien. Die resultierende Bewertung für die PET zeigen [Abb. 9](#) und [Abb. 11](#) und für die Aussentemperatur [Abb. 13](#), [Abb. 15](#), [Abb. 17](#) und [Abb. 19](#).

Auswirkung helle und dunkle Farbgebung auf die PET und θ_a

Für Aussenbereiche, in denen sich Menschen aufhalten, wird tagsüber der thermische Komfort ausgewertet. Bei Dächern hat der thermische Komfort keine Relevanz, da sie in der Regel nicht begehbar sind.

Die Simulationsergebnisse für die Dächer, bei denen tagsüber θ_a ausgewertet wird ([Abb. 12](#)), zeigen, dass helle Dachmaterialien die Lufttemperatur (θ_a) 1.6 m über dem Dach um bis zu 0.1 K senken und sich damit positiv auf das städtische Mikroklima auswirken.

Der thermische Komfort von Fussgängern kann jedoch durch helle, reflektierende Fassaden und Böden negativ beeinflusst werden. Die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) über hellen Oberflächen liegt in den Simulationen im Mittel um bis zu 1.0 K höher als über dunklen Böden, bei Fassaden sind es bis zu 3.5 K ([Abb. 8](#) und [Abb. 10](#)). Dies ist auf die reflektierte kurzwellige Strahlung zurückzuführen, die den empfundenen Hitzestress trotz niedrigerer Lufttemperatur deutlich erhöht. Spielt der thermische Komfort keine Rolle, kann bei Fassaden und Böden tagsüber θ_a ausgewertet werden ([Tabelle 16](#) und [Tabelle 17](#) im Anhang). Dann ist in der Regel die Lufttemperatur in der Nähe von hellen Materialien tiefer (Böden bis zu 0.4 K, Fassaden bis zu 0.2 K).

In der Nacht wird für Dächer, Wände und Böden einheitlich θ_a ausgewertet. Hier ist es bei allen Materialien so, dass die dunkle Farbgebung zu höheren Temperaturen führt.

Eine ausführliche Erläuterung zu den Resultaten findet sich im [Anhang 6.4](#).

Resultate Wandmaterialien

Die Wandmaterialien führen um 14:00 Uhr zu einer PET zwischen 32.3 °C (LB_Glasfassade_Sonnenschutz_d) und 40.6 °C (VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz_h). Um 04:00 Uhr werden auf einer Höhe von 1.7 m Aussenlufttemperaturen θ_a zwischen 21.4 °C (HF_Begrünungselement_feucht) und 23.1 °C (VA_Kompaktfassade_EPS_d und _m) erreicht. Auf der Höhe von 10.7 m liegt θ_a zwischen 21.4 °C (HF_Begrünungselement_feucht) und 22.9 °C (VA_Kompaktfassade_EPS_d). Beim Vergleich der unterschiedlichen Konstruktions-typen für die Wände kann das folgende festgestellt werden:

Zweischalige Fassaden «ZW»

Hier gibt es zwei Untergruppen: Verputzte Backsteinwände mit einer mittigen Luftschicht oder eine jeweils unverputzte Backstein- oder Betonwand mit Kerndämmung.

- Tag: Die Materialien «ZW_Sichtbetonwand_Kerndämmung» und «ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschicht_h» bewirken PET-Werte zwischen 37.3 °C und 40.2 °C. Die Sichtbetonwand mit Kerndämmung führt also zu der niedrigsten PET.
- Nacht: Das Material «ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschicht_h» führt zu dem tiefsten Wert für θ_a dieser Gruppe (22.7 °C).

Wände mit verputzter Aussendämmung «VA»

Diese Wände können in vier Untergruppen unterteilt werden: Zwei Backsteinwände mit einem Dämmputz oder Aerogel und zwei Betonwände mit einer Dämmung aus Steinwolle oder EPS. Die Putzschichten weisen drei Farbtöne (hell (_h), mittel (_m), dunkel (_d)) auf.

- Tag: Das Material, welches die höchste PET (40.6 °C) verursacht, ist «VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz_h», die tiefste PET (36.9 °C) stammt von der Betonwand mit EPS-Dämmung und dunklem Putz (VA_Kompaktfassade_EPS_d).
- Nacht: Die Temperaturdifferenz zwischen den Materialien dieser Kategorie liegt bei 0.9 K. Die höchste θ_a kann bei dem Material «VA_Kompaktfassade_EPS_d» festgestellt werden, die tiefste beim Material «VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz_h».

Leichtbaukonstruktionen «LB»

Bei diesen Konstruktionen werden zwei Untergruppen untersucht: ein Sandwichpaneel mit unterschiedlicher Farbgebung und eine Glasfassade mit oder ohne Verschattung.

- Tag: Die höchste PET mit 38.3 °C weist «LB_Glasfassade» auf, die tiefste PET, 32.3 °C, wird vom dunklen Sonnenschutz (LB_Glasfassade_Sonnenschutz_d) verursacht.
- Nacht: die tiefste θ_a (22.0 °C) entsteht durch die Glasfassade mit dem dunklen oder hellen Sonnenschutz, die höchste θ_a (22.8 °C) wird vom dunklen Sandwichpaneel (LB_Sandwichpaneel_d) hervorgerufen. Damit liegt die Temperaturdifferenz nachts bei 0.8 K.

Hinterlüftete Fassade «HF»

Bei diesen Wandkonstruktionen werden sechs unterschiedliche Verkleidungsarten untersucht: Stein, Photovoltaik, Metall (drei Farbtöne), Holz, eine begrünte Fassade in trockenem und feuchtem Zustand und Faserzement (vier Farbtöne).

- Tag: Die Verkleidungen führen zu PET-Werten zwischen 33.5 °C (HF_Metallblechverkleidung_d) und 38.7 °C (HF_Faserzementverkleidung_h).
- Nacht: Die tiefste θ_a liegt bei der feuchten begrünten Fassade vor (HF_Begrünungselement_feucht, 21.4 °C). Die höchste θ_a wird von der Steinverkleidung und den unterschiedlich gefärbten Faserzementverkleidungen hervorgerufen (HF_Steinverkleidung, HF_Faserzementverkleidung_h, _m, und _d, 22.9 °C). Die Temperaturdifferenz zwischen den Konstruktionen nachts beträgt 1.6 K.

Begrünte Fassade (HF_Begrünungselement)

Die hohe PET für die trockene, begrünte Fassade überrascht zunächst (38.2 °C). Sie kann damit erklärt werden, dass in der Simulation vom schlechtesten Fall, also einer unbewässerten, ausgetrockneten Begrünung ausgegangen wird (siehe auch [Kapitel 1.2](#)). In feuchtem, bewässertem Zustand liegt die PET tagsüber bei 34.6 °C. Die Differenz der PET zwischen trocken und feucht beträgt also tagsüber 3.6 K. Nachts liegt die Differenz für θ_a bei 1 K, wobei auch hier die feuchte Fassade zu der tieferen Aussenlufttemperatur führt.

Reflektierende Anstriche

Diese Anstriche sind auf einer ungedämmten, aber verputzten Backsteinwand aufgebracht (Sanierung). Es gibt drei unterschiedliche Farbtöne.

- Tag: Der dunkle, reflektierende Anstrich (Reflektierender_Anstrich_d) ruft mit 38.1 °C eine tiefere PET hervor, als der helle, reflektierende Anstrich (Reflektierender_Anstrich_h, 40.3 °C).
- Nacht: Der dunkle Anstrich verursacht eine höhere Aussenlufttemperatur als der helle Anstrich. (Reflektierender_Anstrich_d, θ_a = 22.7 °C, Reflektierender_Anstrich_h, θ_a = 22.5 °C).

Resultate Bodenmaterialien

Bei den Böden wird zwischen ganz oder teilweise versiegelten, trockenen Böden und Bodenbegrünungskombinationen aus Rasen oder Wiese mit unterschiedlichen Bodenarten vor Ort und Verschattung durch Bäume unterschieden.

- Tag: bei den ganz- oder teilversiegelten, trockenen Böden verursacht das hochreflektierende «Whitetopping auf Asphalt» mit 38.5 °C die höchste PET, die tiefste PET wird mit dem dunklen «Asphalt_d» mit 37.6 °C erreicht. Bei den Begrünungskombinationen führt der Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil mit Rasen (B_Rasen_trocken_Boden_min_Anteil, 38.0 °C) zur höchsten, der feuchte, beschattete Boden mit erhöhtem organischem Anteil (B_Wiese_feucht_Bäume_-Boden_org_Anteil, 33.3 °C) zur tiefsten PET. Am wirksamsten reduziert wird die PET durch Beschattung und an zweiter Stelle durch Bodenfeuchtigkeit.
- Nachts ist bei den versiegelten, trockenen Böden der Unterschied der verursachten Aussenlufttemperatur zwischen den Materialien sehr klein (θ_a = 22.6–22.9 °C). Auch bei den Begrünungsvarianten ist die Differenz klein (θ_a = 22.4–22.5 °C). Zu beachten ist, dass das Bewertungsverfahren dieser sehr geringen absoluten Differenz ein hohes Gewicht zumisst.

Böden für Grünflächen

Um die Spannweite der Auswirkung von unterschiedlichen natürlich vorhandenen Bodenarten auf das Mikroklima aufzuzeigen, werden ein leichter natürlich vorhandener Torfboden und ein schwerer natürlich vorhandener Lehm-Sandboden untersucht. Diese werden im Materialkatalog «Boden mit erhöhtem organischem Anteil» und «Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil» genannt (abgekürzt: «Boden_org_Anteil», Boden_min_Anteil»).

Von Terrainveränderungen, nur um den vorhandenen Oberboden auszutauschen, ist grundsätzlich abzusehen, da so der natürliche Bodenaufbau gestört wird [4]. Grundsätzlich ist es möglich dem vorhandenen Oberboden ergänzend ein Kultursubstrat beizumischen.

Wie die Simulationen zeigen, wirken sich leichte Böden mit einer guten Wasseraufnahmekapazität günstig auf das Mikroklima aus. Eine Beimischung von Torf ist allerdings aus zwei Gründen ökologisch nicht vertretbar: Erstens ist der Abbau aus Mooren in der Schweiz seit 1987 verboten und zweitens ist mit dem Torfausstiegskonzept des Bundes seit 2012 auch von einer Verwendung importierten Torfs abzusehen. Gründe dafür sind der Schutz von Moorlandschaften und die sehr hohen Treibhausgasemissionen von Torf. Eine Studie zur ökologischen Vertretbarkeit von Torfersatzprodukten zeigt [5], dass heimische Holzfasern und heimischer Rindenhumus tiefe Treibhausgasemissionen aufweisen (siehe auch [Tabelle 13](#) im Kapitel 5.5).

Eine Beimischung von Holzfasern und Rindenhumus kann schwere Böden hinsichtlich des von ihnen beeinflussten Mikroklimas auf ökologisch vertretbare Weise verbessern. Die gleiche Wirkung auf das Mikroklima wie mit einem natürlich vorhandenen Torfboden wird jedoch nicht erzielt. Ist Torf exponiert (und nicht vernässt wie im Moor) kommt er mit Sauerstoff in Kontakt und zersetzt sich. Dabei wird Kohlenstoff in Form von CO₂ freigesetzt. Daher ist torfhaltiger Boden auch bezogen auf die Treibhausgasemissionen schlecht zu bewerten ([Tabelle 13](#) im Kapitel 5.5).

Bei Beimischungen zum natürlich vorhandenen Boden ist die Pflanzenverträglichkeit zu beachten.

Resultate Dachmaterialien

Bei den Dächern ist zwischen belüfteten Konstruktionen für Steildächer mit Ziegel-, Metall- und Faserzementdeckung und Flachdachkonstruktionen (nicht begrünt und begrünt) zu unterscheiden. Es wird die Aussenlufttemperatur θ_a 1.6 m über der Dachebene ausgewertet.

- Tag: Bei den Steildächern führt die dunkle Faserzementdeckung und die dunkle Ziegeldeckung zu der höchsten (D_Faserzement_d, D_Ziegel_d, 33.8 °C), die helle Metalldeckung zu der tiefsten Aussenlufttemperatur (D_Metalldeckung_h, 33.6 °C). Bei den Flachdächern verursacht das Nacktdach mit Bitumendichtung (D_Bitumen) mit 34.2 °C die höchste, das feuchte intensiv begrünte Flachdach (D_Intensiv_Begrünung_feucht) mit 33.5 °C die tiefste Aussenlufttemperatur.
- Nacht: Die Aussenlufttemperaturen über den Steildächern und den nichtbegrüntem Flachdächern liegen maximal 0.3 K auseinander. Ein etwas grösserer Unterschied von maximal 0.4 K liegt zwischen begrünten Dächern in trockenem (D_Photovoltaik_Extensiv_Begrünung_trocken, 22.1 °C) und feuchtem Zustand (D_Intensiv_Begrünung_trocken und _feucht, 21.7 °C).

Trockene Grünflächen und Dachbegrünungen

Die thermischen Eigenschaften und damit der Verdunstungseffekt von Begrünungen sind von der Boden- und Substratfeuchte abhängig und können stark variieren. Untersuchungen haben gezeigt, dass zum Beispiel Rasenflächen das Mikroklima nur verbessern können, wenn der Boden feucht genug ist [6]. Studien über die positive Wirkung von Grünflächen auf das Mikroklima basieren oft auf Untersuchungen von feuchten, und daher wahrscheinlich bewässerten, Grünflächen [7], [8], [9], [10]. Dies führt zu der falschen Schlussfolgerung, dass Grünflächen immer das gleiche Kühlpotenzial haben. Damit wird bei der Planung häufig die Variabilität innerhalb der verschiedenen Arten von Grünflächen vernachlässigt.

Aus diesem Grund sind im Materialkatalog alle Begrünungen in trockenem und feuchtem Zustand berücksichtigt. Die in den Simulationen ausgewertete Periode liegt am Ende einer Hitzewelle. Wird kein Wasser zugeführt, dann sind die oberen Schichten des Bodens ausgetrocknet. Dies gilt je nach Substratdicke in noch stärkerem Mass für die Flachdächer. Der Verdunstungseffekt ist unter den gewählten Einstellungen im Simulationsprogramm (und auch in der Realität [6]) nicht mehr vorhanden. Für die trockenen Begrünungen wird also der schlechteste Fall dargestellt.

In feuchtem Zustand verfügen die Begrünungen in der Simulation über ausreichend Wasser. Die Vergleiche in besonnem Zustand zeigen, dass beim Boden mit Rasen und Wiese der Unterschied der PET bei 2.6 K liegt ($B_{\text{trocken_Boden_min_Anteil}}$, $B_{\text{feucht_Boden_min_Anteil}}$). Über dem Dach tritt für θ_a eine Differenz von 0.3 K auf ($D_{\text{Photovoltaik_Extensiv_Begrünung_trocken}}$ und $D_{\text{Intensiv_Begrünung_feucht}}$).

Vor dem Hintergrund des Klimawandels kann mit längeren Trockenperioden (und potenziellen Bewässerungsverboten) gerechnet werden. Da die Wurzeln von Rasenflächen nicht tief in den Boden reichen, können Rasenflächen schnell austrocknen [11]. Um das Kühlpotenzial von Rasenflächen zu erhalten, sind grössere Wassermengen für die Bewässerung erforderlich als beispielsweise für die Bewässerung von tiefwurzelnden Bäumen [12]. Eine vorbeugende Massnahme gegen Austrocknung ist die Beschattung von Grünflächen. Dies erhöht auch den thermischen Komfort, da die Beschattung die Einstrahlung und damit den Hitzestress reduziert [13], [14].

Es empfiehlt sich also Grünflächen mit einem entsprechenden Beschattungs- und ökologisch vertretbarem Bewässerungskonzept (Regenwasser) zu planen.

2.1.2 Bewertung und Schlussfolgerung

Von den 65 untersuchten Materialien verursachen 10 eine PET unter 35 °C. Gemäss [Tabelle 11](#) weisen diese Werte auf eine «mässige Wärmebelastung» hin. 55 Konstruktionen verursachen eine PET > 35 °C und indizieren damit eine «starke Wärmebelastung». [Abb.8](#) bis [Abb.19](#) zeigen die PET und die Aussentemperatur θ_a in der Übersicht, sowie die entsprechende Bewertung.

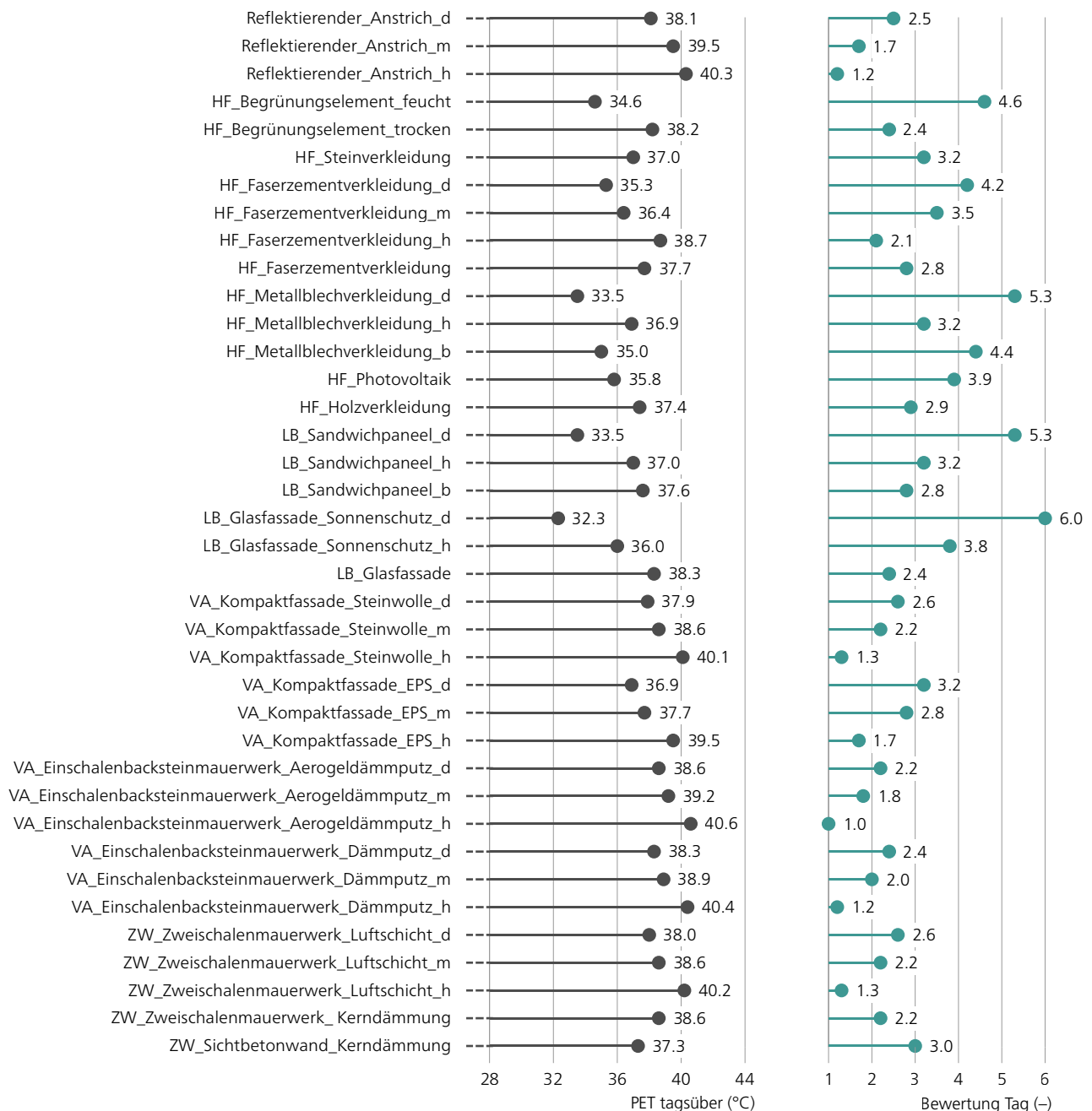


Abb.8+9 Ergebnisse PET tagsüber, 14:00 Uhr für die Fassaden (links) und die Bewertung (rechts). Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).

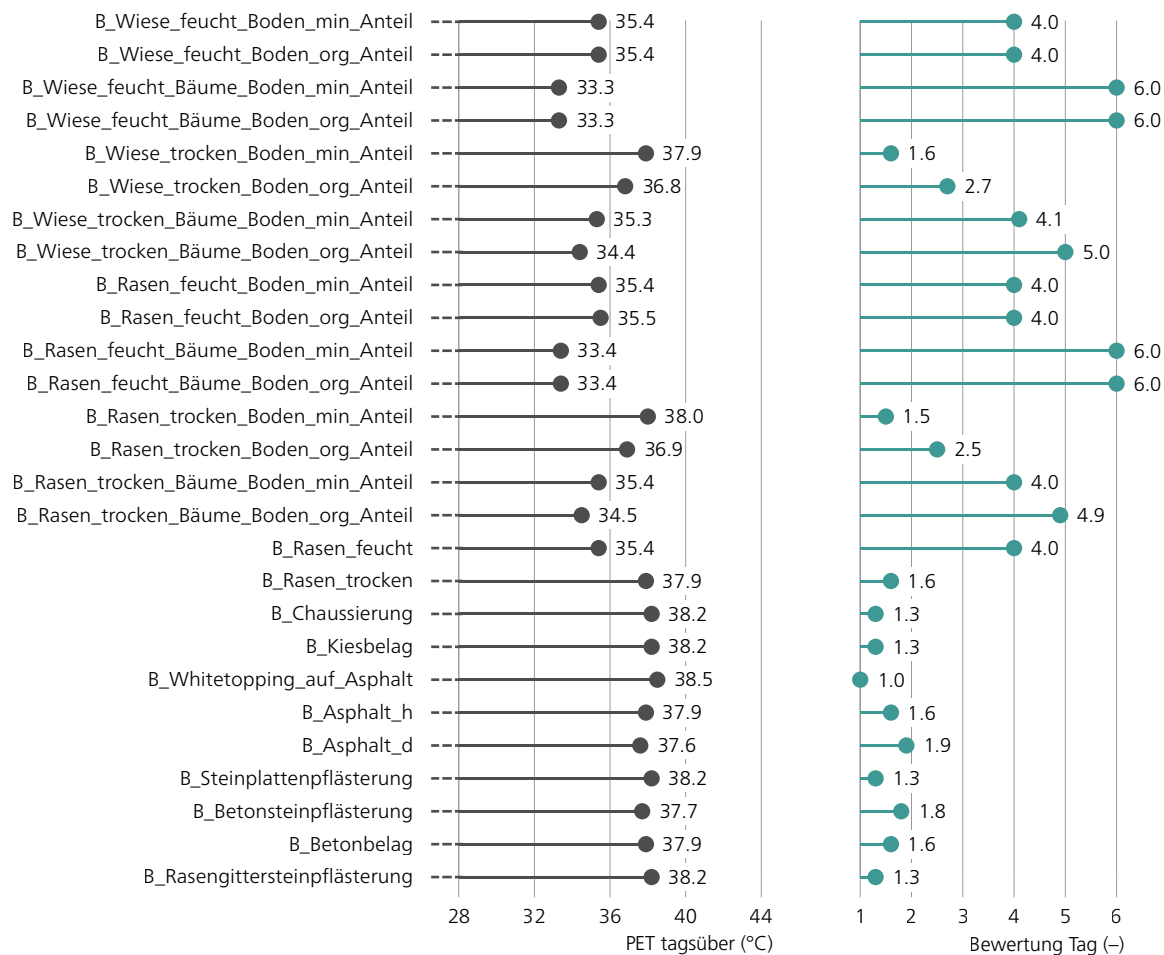


Abb. 10+11 Ergebnisse PET tagsüber, 14:00 Uhr für die Böden (links) und die Bewertung (rechts). Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1.](#)

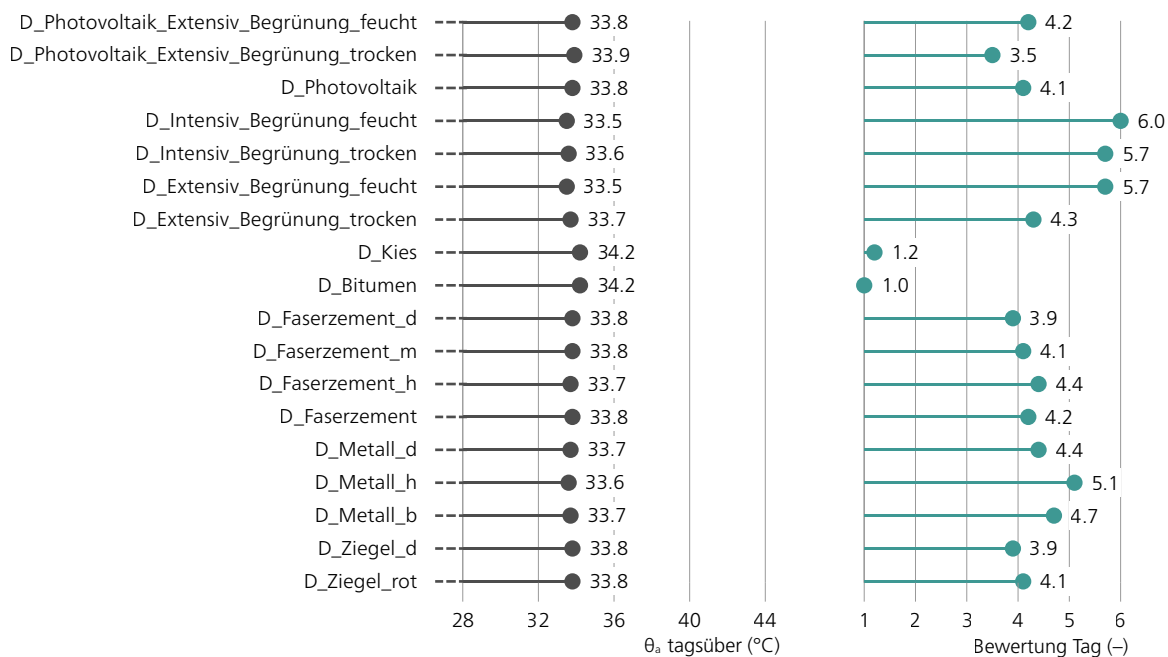


Abb. 12+13 Ergebnisse θ_a tagsüber, 14:00 Uhr für die Dächer (links) und die Bewertung (rechts). Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1.](#)

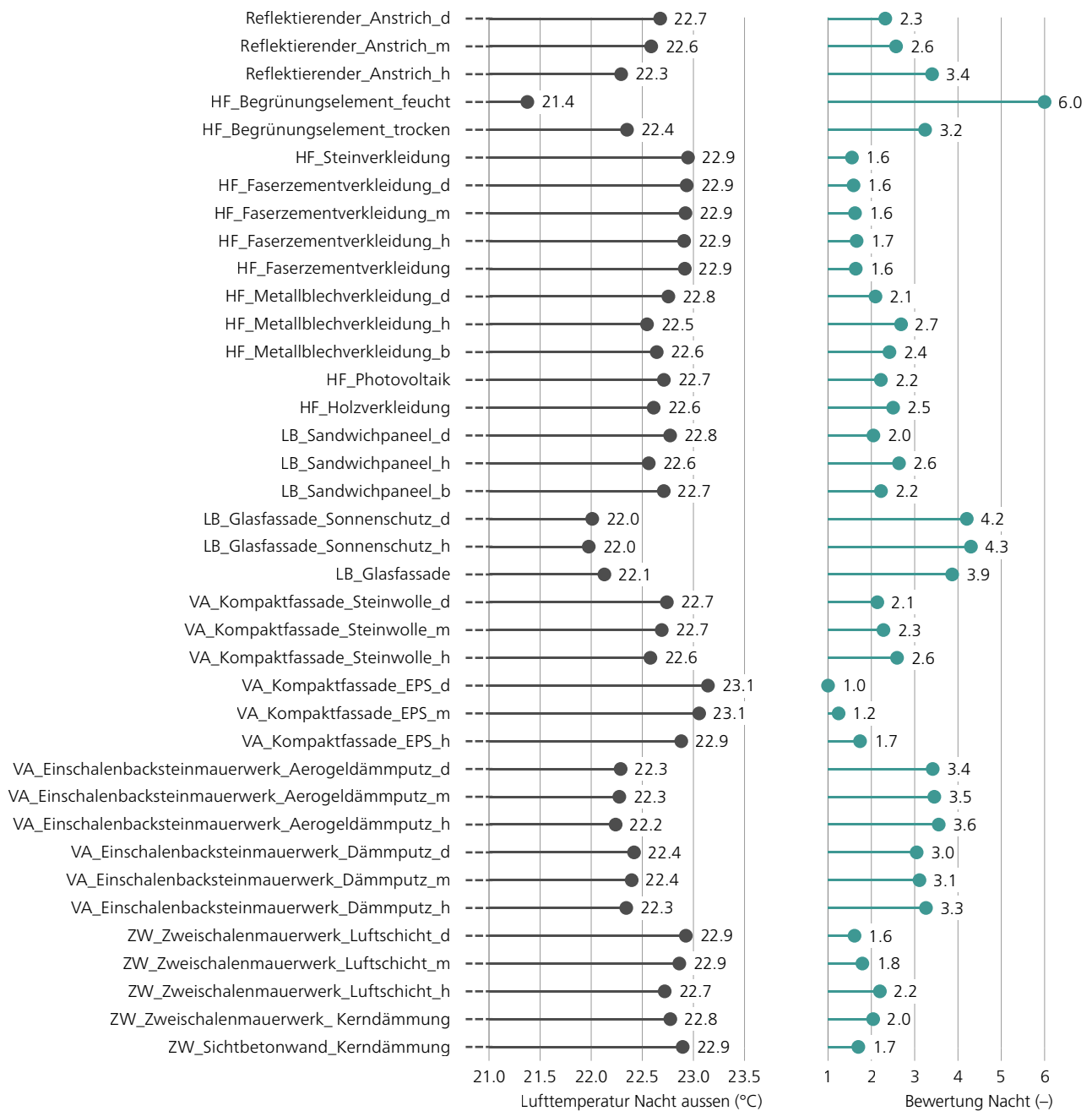


Abb. 14+15 Lufttemperatur (θ_a) Nacht aussen, 04:00 Uhr für die Fassaden (links) und die Bewertung (rechts). Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis](#) und [Abb. 1](#).

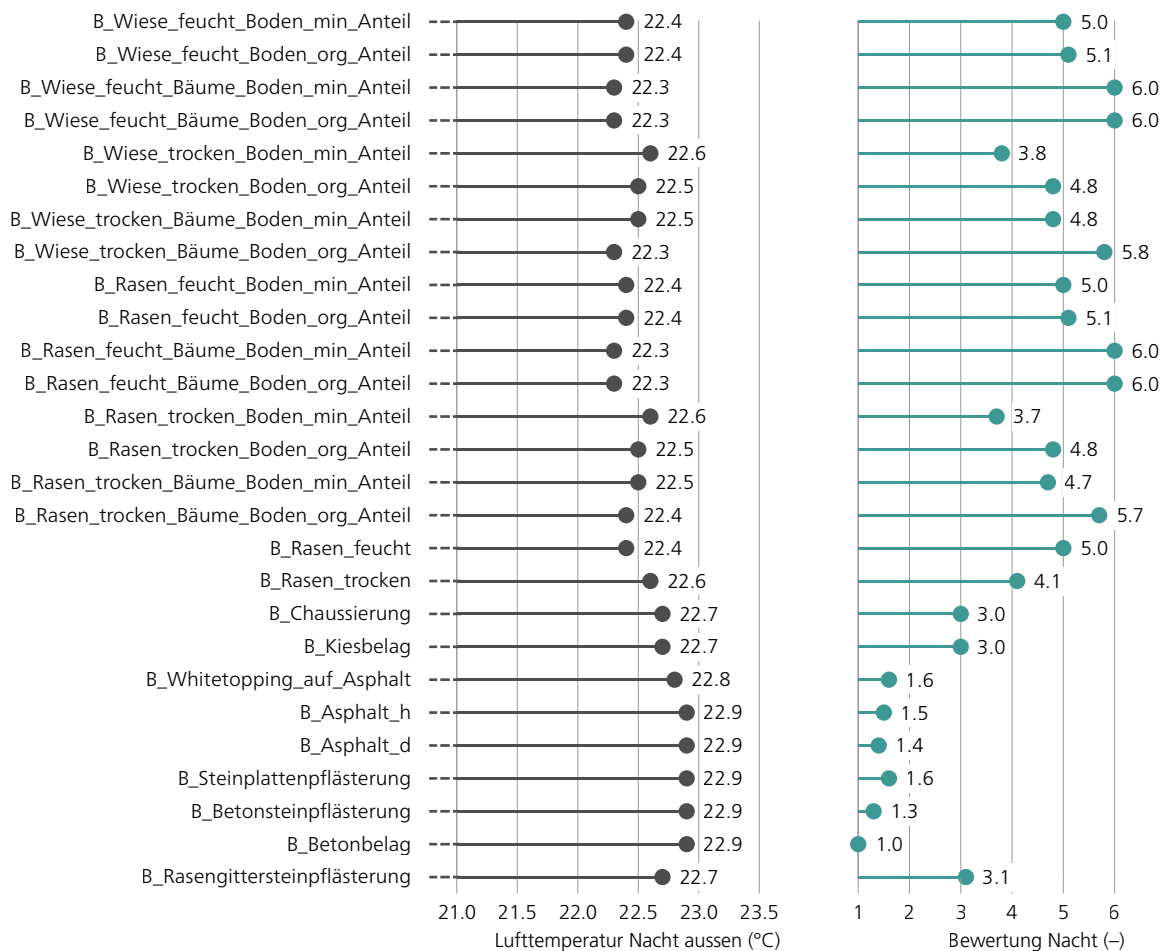


Abb. 16+17 Lufttemperatur (θ_a) Nacht aussen, 04:00 Uhr für die Böden (links) und die Bewertung (rechts).
Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).

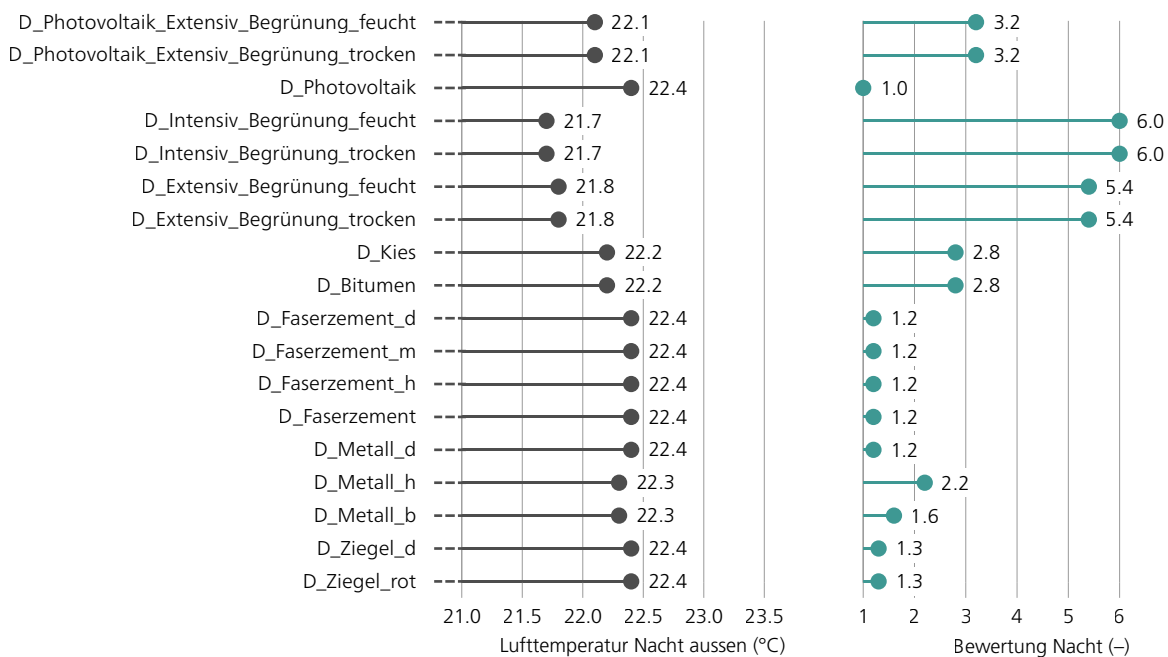


Abb. 18+19 Lufttemperatur (θ_a) Nacht aussen, 04:00 Uhr für die Dächer (links) und die Bewertung (rechts).
Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).

Wandkonstruktionen

In der Gruppe zweischalige Wandkonstruktionen (ZW) führt «ZW_Sichtbetonwand_Kern-dämmung» zu den tiefsten PET-Werten (PET 37.3 °C, Bewertung: 3.0 [\(Abb. 9\)](#)). In der Gruppe verputzte Aussendämmung (VA) verursacht die Kompaktfassade auf Beton mit EPS und einem dunklen Putz den geringsten Hitzestress (VA_Kompaktfassade_EPS_d: PET 36.9 °C, Bewertung 3.2). In den Gruppen Leichtbau (LB) und hinterlüftete Fassaden (HF) rufen der dunkle Sonnenschutz (LB_Glasfassade_Sonnenschutz_d), die hinterlüftete Metallverkleidung (HF_Metallblechverkleidung_d) und das Sandwichpaneel mit den dunklen Farben (LB_Sandwichpaneel_d) eine tiefe PET hervor. Dies liegt daran, dass die dunkel gefärbten Metallschichten weniger kurzwellige Strahlung reflektieren. Damit werden die genannten Konstruktionen sehr gut bewertet (Bewertung: 5.3–6.0).

Der Unterschied zwischen der höchsten und der tiefsten PET bei allen Wandkonstruktionen liegt bei 8.4 K, also mehr als einen Kategorien-Umfang in [Tabelle 11](#). Wenn zwischen dunklen und hellen Farben gewählt werden kann, so verursacht dies bei der PET eine Differenz zwischen 2.0 und 2.6 K. Bei Faserzement und Metallverkleidungen kann der Unterschied zwischen dunkler und heller Farbe zwischen 3.4 und 4.1 K liegen. In allen Fällen weist die dunklere Farbe die tiefere PET auf. Nachts um 04:00 Uhr beträgt auf der Ebene von 1.7 m der Unterschied zwischen allen Wänden 1.8 K. Auf der Ebene von 10.7 m, die relevant für die Nachtlüftung ist, liegt die Differenz bei 1.5 K.

Auch wenn die Unterschiede, wie sich die Materialien auf das Mikroklima auswirken, klein scheinen, so ist es sinnvoll, bei der Planung von Stadträumen die Materialwahl zu berücksichtigen. Auch kleine Differenzen bilden einen Teil des grösseren Ganzen und können so, zusammen mit anderen Massnahmen, zum besseren Mikroklima einer Stadt einen wesentlichen Beitrag leisten.

Dass kleine Beiträge wichtig sind, wird dadurch unterstrichen, dass gerade kleinere Temperaturerhöhungen während Hitzewellen einen starken Einfluss auf die Sterblichkeit haben. Dies liegt daran, dass bei Temperaturextremen die Abhängigkeit der Mortalität von der Temperatur exponentiell zunimmt [\[15\]](#).

Bodenkonstruktionen

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass tagsüber (14:00 Uhr) die Wahl einer spezifischen trockenen, unbegrüntem Bodenkonstruktion im Mikroklima des betrachteten Areals einen Unterschied von bis zu 1.0 K bei der PET verursachen kann. Die mittleren Werte für die PET aller Rezeptoren liegen zwischen 37.6 °C (B_Asphalt_d) und 38.5 °C (B_White_Topping).

Für die begrünten, unbeschatteten Böden liegt die Differenz in feuchtem und trockenem Zustand bei maximal 2.6 K (PET 35.4 °C und 38.0 °C). Mit Beschattung durch Bäume beträgt diese Differenz 2.0 K (PET 33.3 °C und 35.4 °C), allerdings insgesamt auf einem um zusätzliche gut 2 K tieferem Niveau. Da die PET stark von direkter Sonneneinstrahlung beeinflusst wird, ist die wirksamste Massnahme zur Verbesserung des Mikroklimas damit eine Beschattung, am besten durch Bäume (PET feucht, unbeschattet entspricht trocken beschattet). Bei Grünflächen spielt es eine grosse Rolle, ob diese trocken, oder bewässert und damit feucht sind (siehe dazu auch [«Infobox: Trockene Grünflächen und Dachbegrünungen»](#)). Von der Bodenart führen Böden mit erhöhtem organischem Anteil tagsüber in trockenem Zustand zu einer um bis zu 1 K tieferen PET als Böden mit erhöhtem mineralischem Anteil. In feuchtem Zustand sind kaum Differenzen auszumachen. Nachts ruft der trockene Boden mit erhöhtem organischem Anteil eine geringfügig tiefere Aussenlufttemperatur als der Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil hervor (Differenz $\theta_{a,max}$ 0.1 K). Eine ökologisch vertretbare Verbesserung des vom Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil beeinflussten Mikroklimas ist somit durch eine Beimischung von Holzfasern und Rindenhumus möglich (siehe [«Infobox: Böden für Grünflächen»](#)).

In den Simulationen wurde nur eine Beschattung durch Bäume untersucht. Diese ist am vorteilhaftesten, da zusätzlich Evapotranspiration stattfindet und durch die Blätter Regen auf den Boden gelangen kann.

Bei ganz oder teilweise versiegelten, trockenen Böden führen helle Böden zu einer höheren PET als dunkelfarbige Böden. Ohne zusätzliche Beschattungsmassnahmen kann allein durch den Bodenbelag keine markante Verbesserung des thermischen Komforts erreicht werden, dies deckt sich auch mit [\[13\]](#). [Abb. 11](#) zeigt, dass die zwei Bodenmaterialien mit der höchsten Bewertung in dieser Gruppe «B_Asphalt_d» und «B_Betonsteinpflasterung» sind. Am schlechtesten bewertet wird «B_Whitetopping_auf_Asphalt».

Dachkonstruktionen

Tag: Bei den belüfteten Dachkonstruktionen verursacht die helle Metalldeckung (D_Metalldeckung_h) die tiefste Aussenlufttemperatur (33.6 °C). Bei den Flachdächern stellt sich über dem feuchten, intensiv begrünten Flachdach die tiefste Aussenlufttemperatur ein (D_Intensiv_Begrünung_feucht, 33.5 °C). Von den drei nichtbegrüntem Flachdächern führt das Photovoltaikdach zur tiefsten Aussenlufttemperatur (D_Photovoltaik, 33.8 °C).

Nacht: die Aussenlufttemperaturdifferenzen über den nichtbegrüntem Dächern sind insgesamt mit 0.3 K klein, die Unterschiede zwischen den begrünten Dächern liegen bei 0.4 K (tiefste θ_a über D_Intensiv_Begrünung_trocken und _feucht, beide 21.7 °C).

Empfehlungen Boden, Dach und Wände

Die Ergebnisse zeigen, dass tagsüber in der Sonne die PET über hellen Bodenoberflächen und in der Nähe von hellen Fassaden höher liegt als bei dunklen Flächen. Der thermische Komfort von Personen auf Strassenniveau wird also durch reflektierende Oberflächen negativ beeinflusst. Der Effekt der reflektierten, kurzwelligen Strahlung übersteigt den Effekt der niedrigeren Lufttemperatur auf den empfundenen Hitzestress deutlich. Da die Lufttemperatur in der Nähe von hellen Bodenmaterialien in der Regel tiefer als über dunklen Materialien ist, verringern diese den Wärmeinseleffekt (**Tabelle 16** und **Tabelle 17** im Anhang). Bei Dächern ist das gleiche Verhalten feststellbar, allerdings hat hier in der Regel der thermische Komfort keine Relevanz.

Aus diesen Erkenntnissen lassen sich Empfehlungen für die Materialwahl ableiten, die sich je nach stadtklimatischer Zielsetzung unterscheiden. Zur Verbesserung des Stadtklimas und des thermischen Komforts ist wo immer möglich eine Begrünung zu wählen. Bei Böden am besten in Kombination mit Bäumen. Allerdings ist dabei auch ein ressourcenschonendes Bewässerungskonzept einzuplanen, da in der Regel nur eine feuchte Begrünung einen nennenswerten Beitrag leisten kann. Ist keine Begrünung möglich, sind – möglichst in Kombination mit einer wirksamen Verschattung – zur Verbesserung des thermischen Komforts bei den Böden eher mittelgetönte, versickerungsfähige Beläge zu wählen. Bei Fassaden sind nach begrünten Fassaden hinterlüftete Fassaden und Leichtbaufassaden mit mittelgetönten Farben zu empfehlen. Der städtische Wärmeinseleffekt, sowohl bezogen auf die Oberflächentemperatur als auch auf die Aussenlufttemperatur am Tag und in der Nacht, wird durch möglichst helle Oberflächen verringert.

Zielsetzung	Prio.	Dachflächen (nicht begehbar)	Bodenflächen, begehbare Dachflächen	Fassaden
Abmilderung Wärmeinsel- effekt	1	Begrünte Dachflächen (am besten Intensiv- begrünung mit wasser- speichernder Schicht), ggf. mit Solaranteil	Feuchte Begrünung (bei Bodenflächen in Kom- bination mit Bäumen)	Begrünte Fassaden.
	2	Helle (hinterlüftete) Dachflächen	Hellgetönte, mittelgetönte, versickerungsfähige* Beläge	Hinterlüftete Fassaden, Leichtbau
	3	Dunkle (hinterlüftete) Dachflächen	Hellgetönte, mittelgetönte, wasserundurchlässige Beläge	Reflektierende Anstriche, zweischalige Wandkon- struktionen und verputzte Aussenwände mit hellen Farben.
Verbesserung thermischer Komfort	1	n.a.	Feuchte Begrünung (bei Bodenflächen in Kom- bination mit Bäumen). Falls (umweltverträglich) möglich leichte Böden mit erhöhtem organischem Anteil wählen.	Begrünte Fassaden.
	2	n.a.	mittelgetönte, versicke- rungsfähige* Beläge mit Verschattungselementen	Hinterlüftete Fassaden, Leichtbau mit mittelgetönten Farben
	3	n.a.	mittelgetönte, wasser- undurchlässige Beläge (wenn möglich mit Ver- schattungselementen)	Zweischalige Wandkon- struktionen, verputzte Aussenwände und reflek- tierende Anstriche mit mittelgetönten Farben.

* Die Versickerungsfähigkeit wirkt sich nicht unmittelbar auf den thermischen Komfort aus, ist aber im Sinne einer ganzheitlichen Planung nach Möglichkeit zu bevorzugen.

2.2 Strahlungstechnische Grössen

2.2.1 Albedo

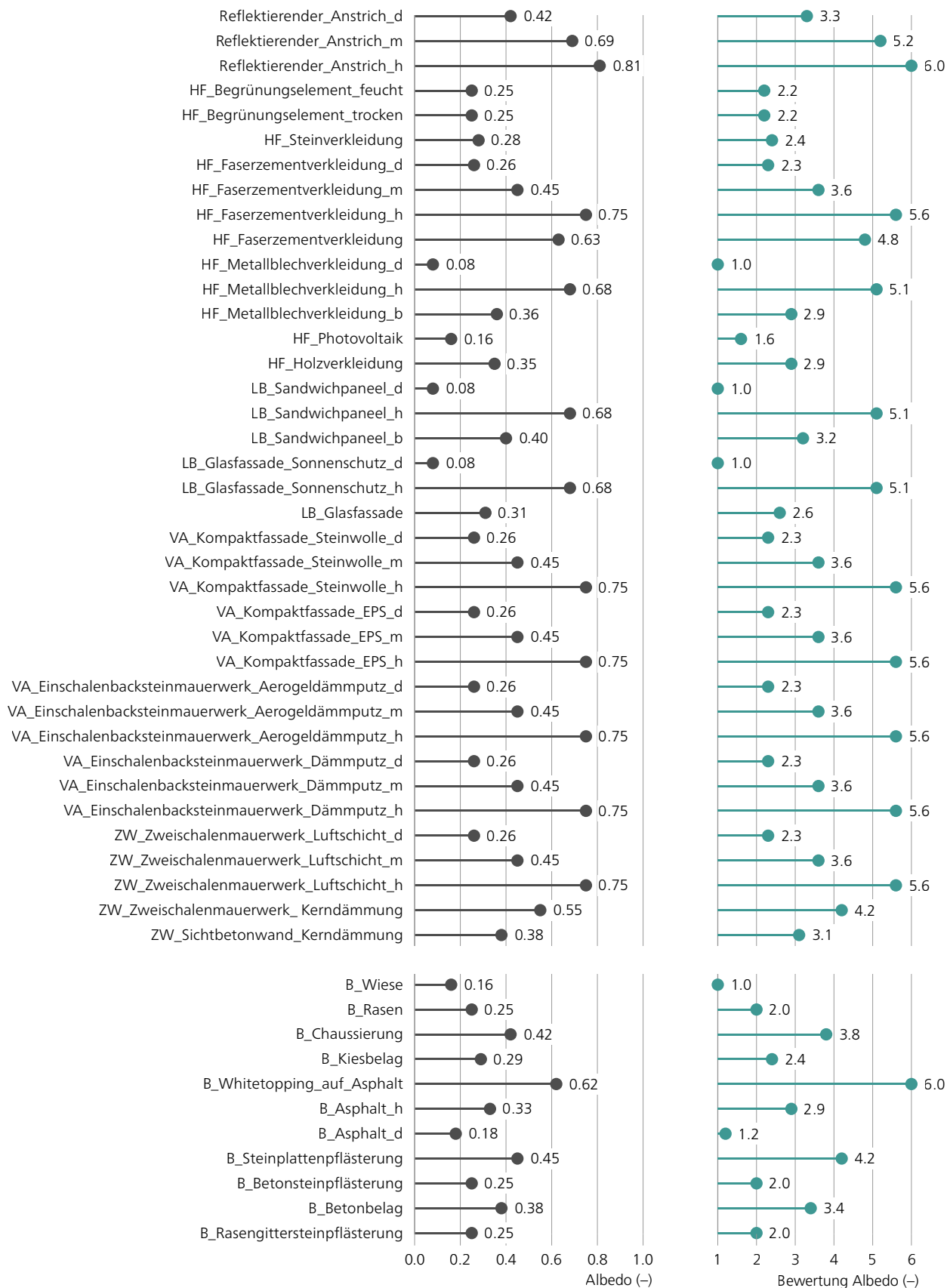


Abb. 20+21 Albedo Fassaden und Böden (links) und die Bewertung (rechts).
Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).

[Abb.20](#) und [Abb.22](#) zeigen die Albedo für alle Konstruktionen und [Abb.21](#) und [Abb.23](#) die Bewertung. Unter Albedo versteht man das Mass für das Rückstrahlvermögen (Reflexionsstrahlung) von nicht selber leuchtenden, diffus reflektierenden, nicht spiegelnden Oberflächen (siehe auch Definition [Kapitel 5.2.2](#)). Eine hohe Albedo bedeutet, dass ein grosser Teil der Strahlung reflektiert wird.

Es zeigt sich, dass in der Gruppe der Bodenkonstruktionen das Material «B_Whitetopping» das höchste, also beste, Rückstrahlvermögen aufweist. Die tiefste Albedo tritt beim dunklen Asphalt (B_Asphalt) auf. Wie zu erwarten, weisen bei den Wandkonstruktionen die hellen Farben eine höhere Albedo als die Dunklen auf. Dementsprechend fällt auch die Bewertung aus. Hier ist das am besten bewertete Material der helle, reflektierende Anstrich. Die Materialien mit dem geringsten Rückstrahlvermögen sind dunklen Metalloberflächen. Bei den Dachmaterialien hat die helle Faserzementdeckung die höchste Albedo. Den tiefsten Wert weist auch hier das dunkle Metaldach auf.

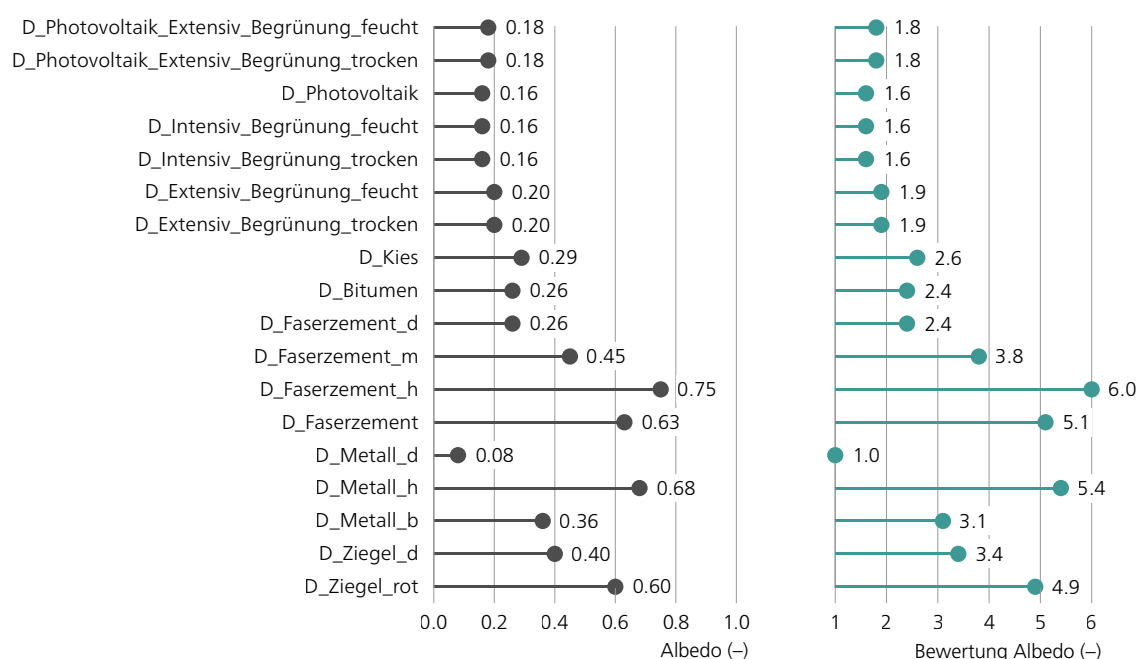


Abb. 22+23 Albedo Dächer (links) und die Bewertung (rechts).

Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).

2.2.2 Solar Reflectance Index (SRI)

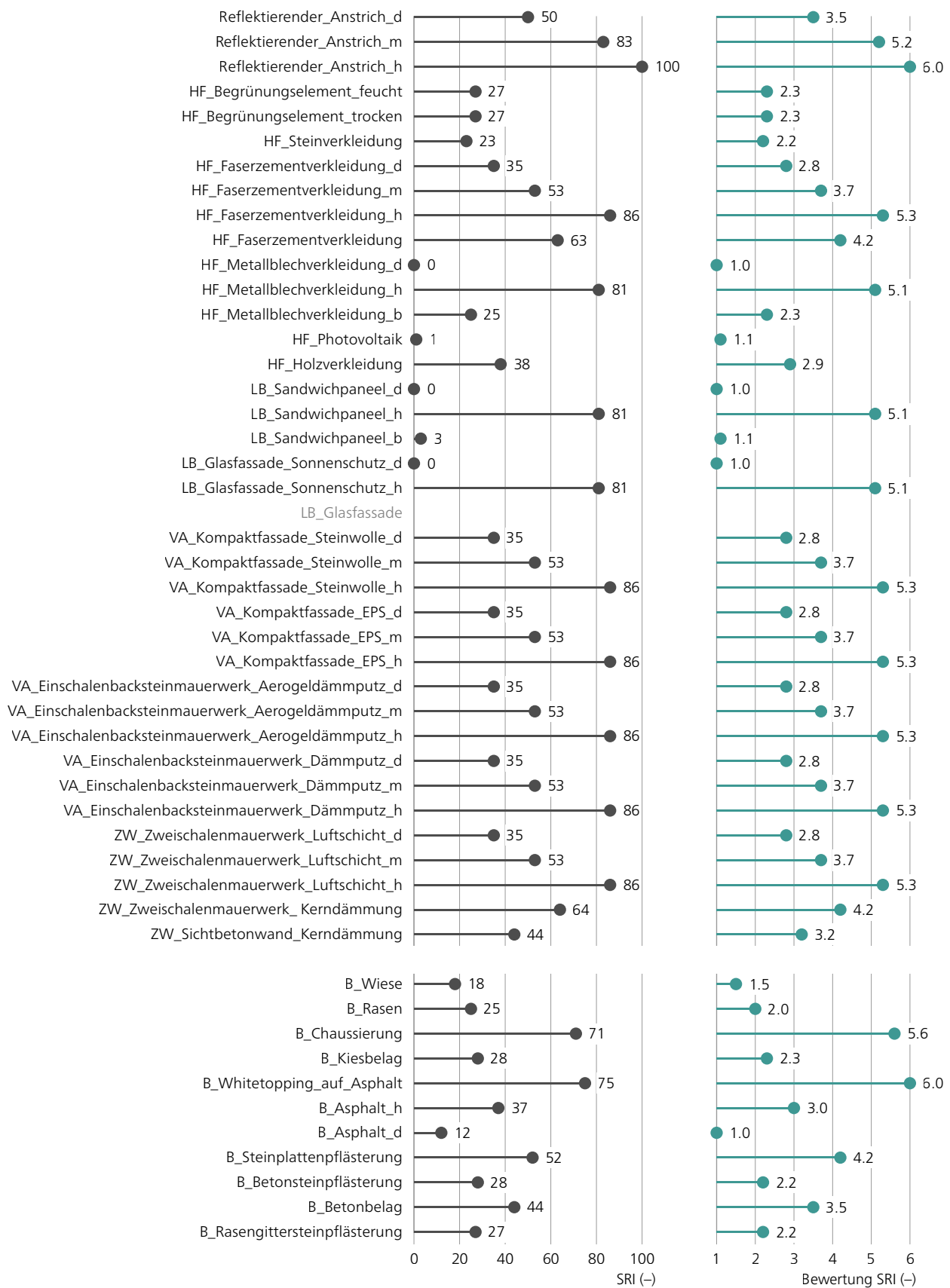


Abb. 24+25 Solar Reflectance Index (SRI) Fassaden und Böden (links) und die Bewertung (rechts). Einige Materialien haben einen SRI von «0». Beim Material «LB_Glasfassade» sind keine Daten verfügbar. Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).

[Abb. 24](#) und [Abb. 26](#) zeigen den «Solar Reflectance Index» und [Abb. 25](#) und [Abb. 27](#) die resultierende Bewertung. Mit diesem Index können die Effekte von solarer Reflexion und thermischer Emissivität kombiniert betrachtet werden. Je höher der SRI-Wert ist, desto geringer ist der Aufheizeffekt infolge solarer Strahlung auf die Oberfläche. Die Rangfolge ist ähnlich wie bei der Albedo.

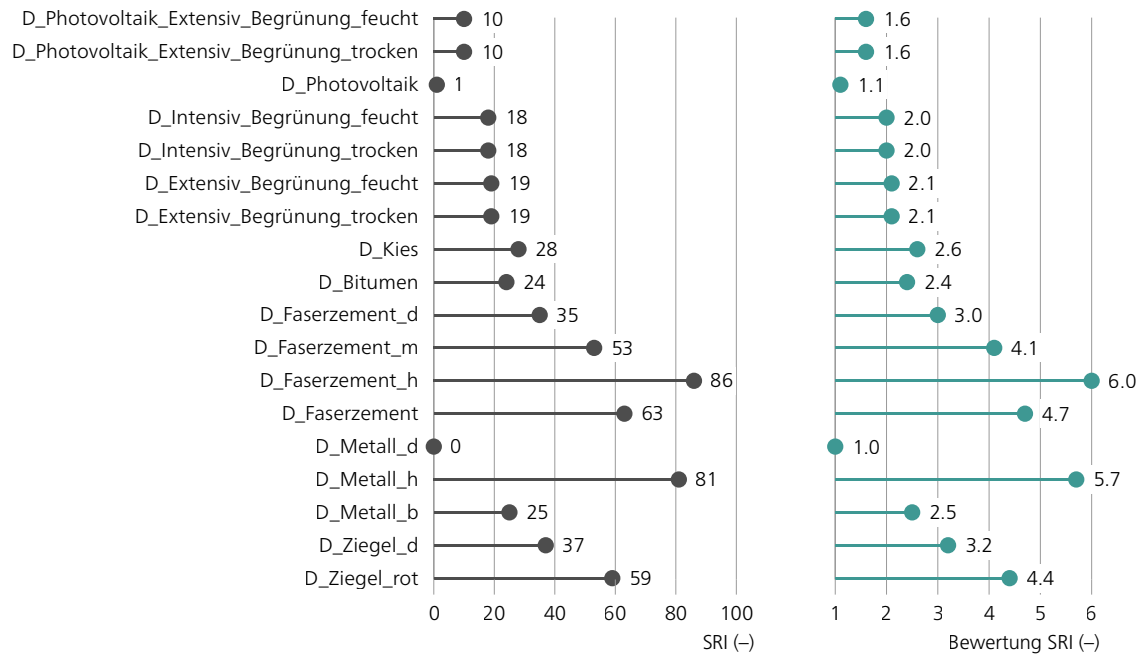


Abb. 26+27 Solar Reflectance Index (SRI) Dächer (links) und die Bewertung (rechts). Einige Materialien haben einen SRI von «0». Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).

2.2.3 Visuelle Eigenschaften

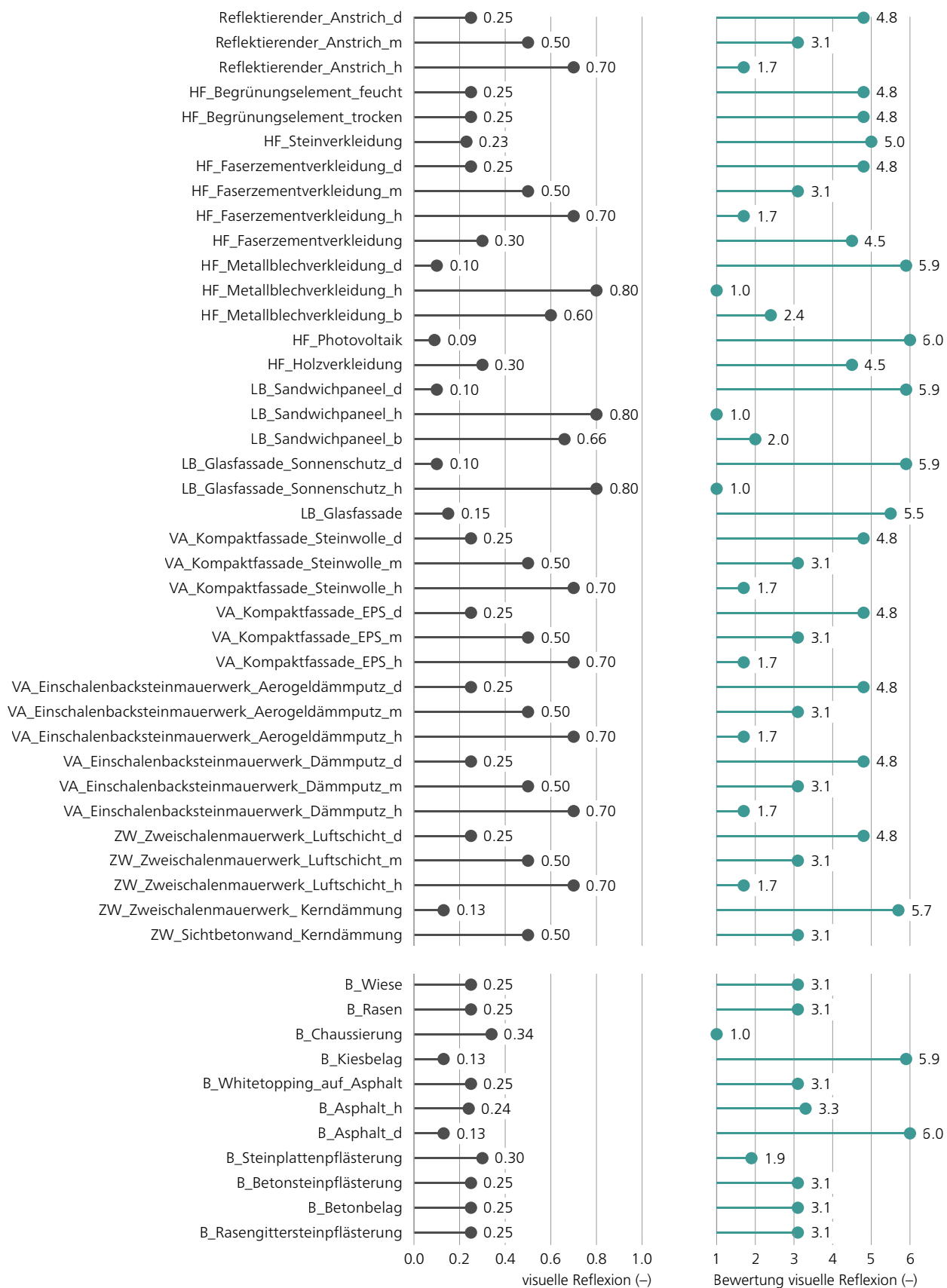


Abb. 28+29 Visuelle Reflexion Fassaden und Böden (links) und die Bewertung (rechts). Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).

[Abb. 28](#) und [Abb. 30](#) zeigen die visuelle Reflexion, die Bewertung ist in den [Abb. 29](#) und [Abb. 31](#) wiedergegeben. Der Reflexionsgrad besagt, wie gross der reflektierte Anteil auftreffender Strahlung im sichtbaren Lichtspektrum ist. Ein hoher Reflexionsgrad kann Blendung hervorrufen. Damit sind die Bewertungen gegenläufig zur Albedo und zum SRI. Eine gute Bewertung bekommen Materialien, die wenig Blendung hervorrufen können. Dies sind dann tendenziell die Materialien mit einer dunklen Oberfläche. Bei Dächern ist die visuelle Reflexion nur dann relevant, wenn die Dachfläche im Sichtbereich von umliegenden Gebäuden liegt.

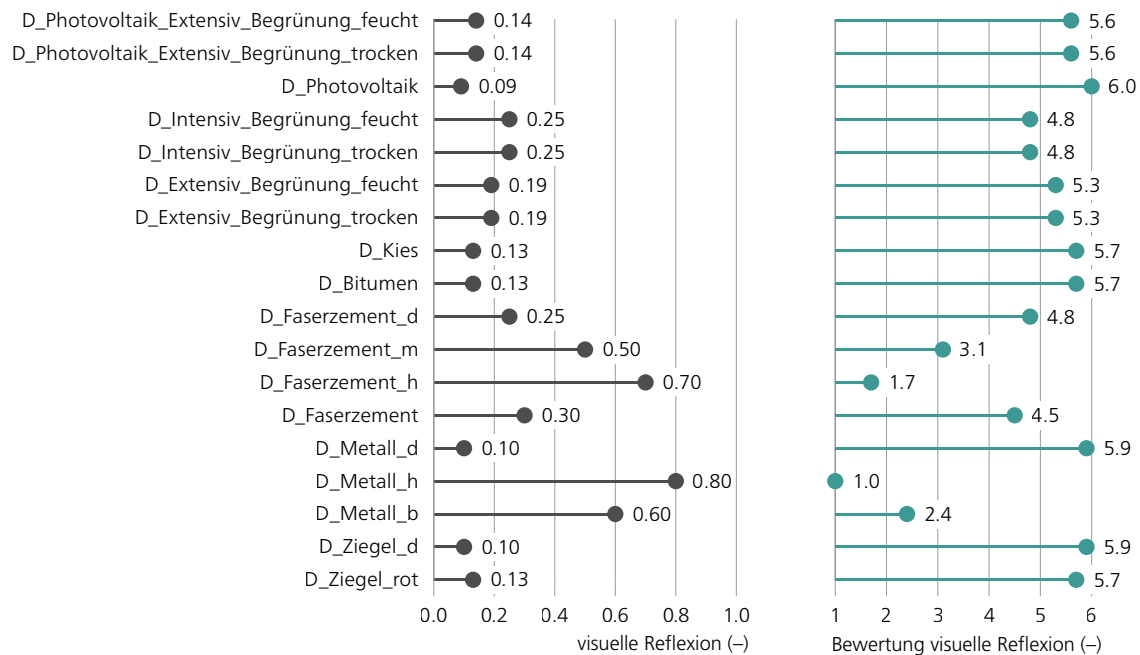


Abb. 30+31 Visuelle Reflexion Dächer (links) und die Bewertung (rechts).
Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis](#) und [Abb. 1](#).

2.3 Nachhaltigkeit

2.3.1 Lebensdauer

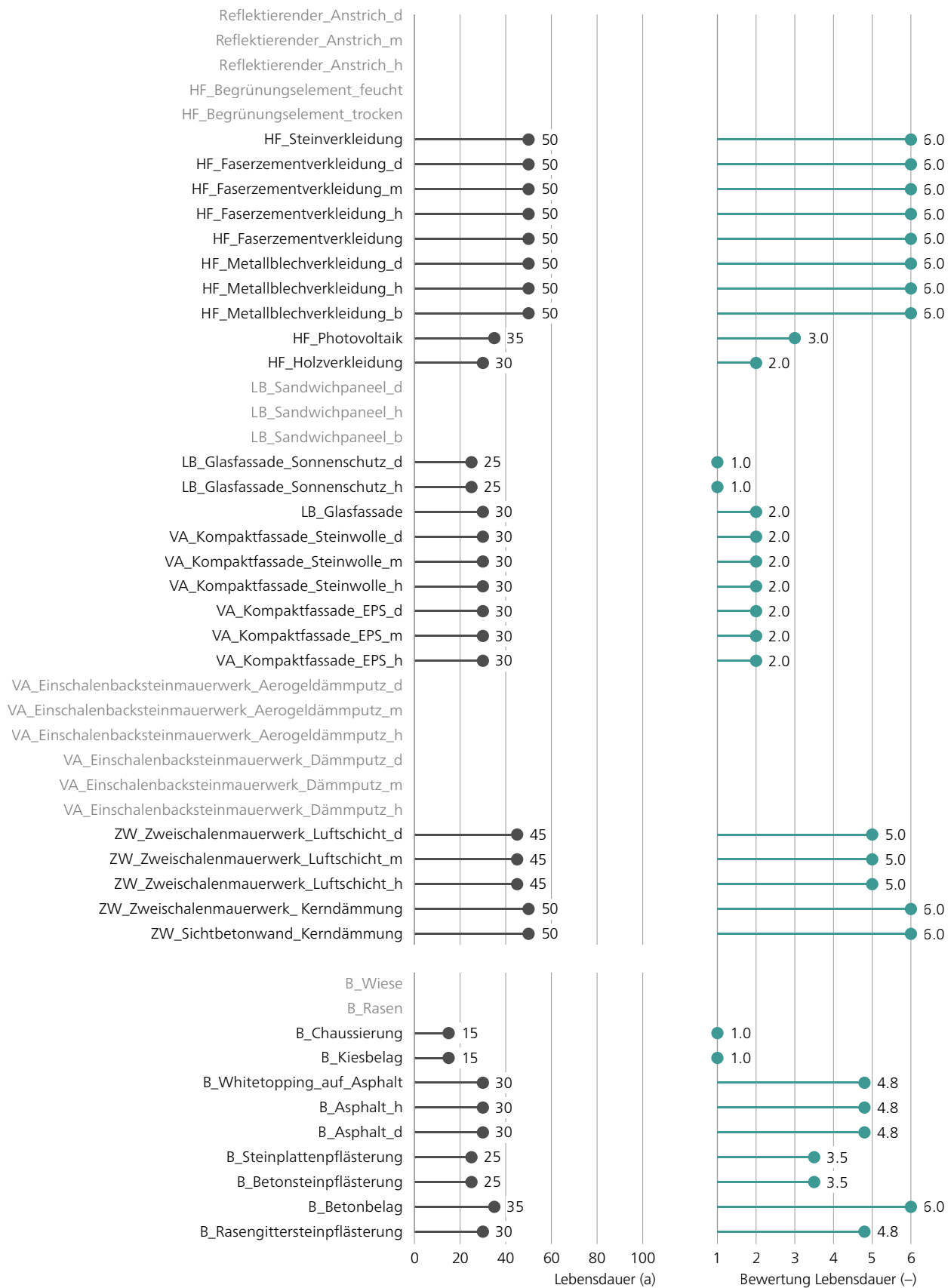


Abb. 32+33 Lebensdauer Fassaden und Böden (links) und die Bewertung (rechts).
Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).

[Abb. 32](#) und [Abb. 34](#) zeigen die durchschnittliche Lebensdauer aller Konstruktionen, [Abb. 33](#) und [Abb. 35](#) die entsprechende Bewertung. Eine lange Lebensdauer der Bauteile spart Ressourcen, da ein Ersatz erst später notwendig wird.

Von den Bodenkonstruktionen weisen «B_Betonbelag» und geschlossene Oberflächen eine lange Lebensdauer auf. «B_Kiesbelag» und «B_Chaussierung», also Materialien mit einer hohen Versickerungsfähigkeit, müssen nach 15 Jahren erneuert, oder überholt werden. Ein versickerungsfähiges Material mit einer langen Lebensdauer sind Rasengittersteine.

Bei den Wandkonstruktionen sind hinterlüftete Fassaden und zweischalige Konstruktionen besonders langlebig. Dies trifft bei den Dachkonstruktionen auch auf die hinterlüfteten Steildachkonstruktionen zu.

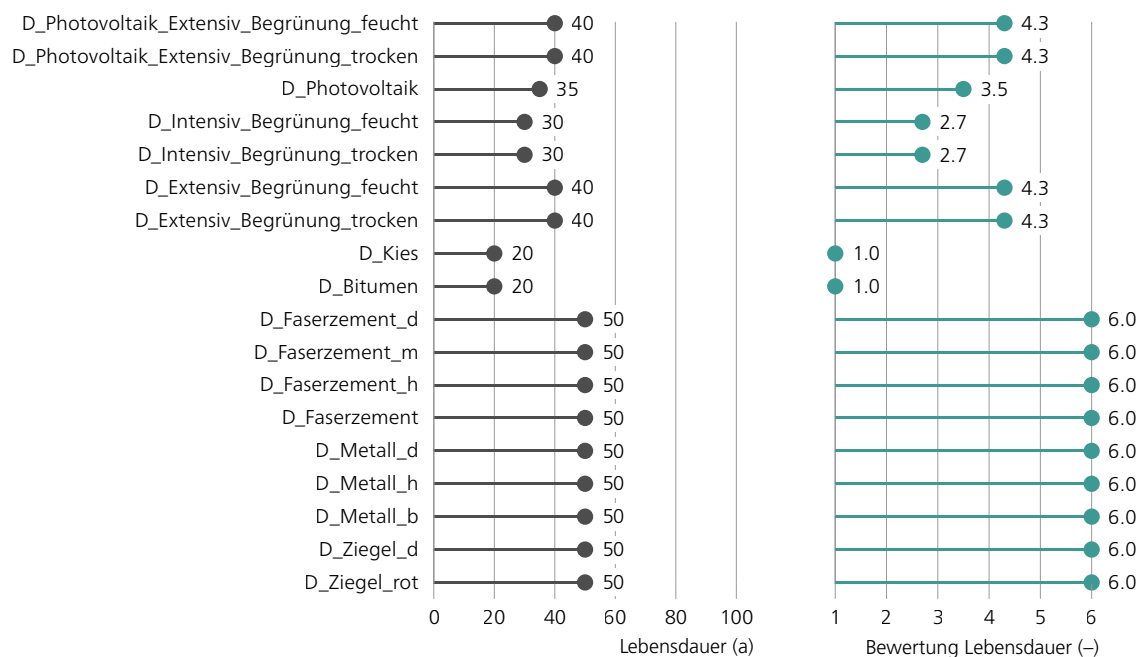


Abb. 34+35 34 Lebensdauer Dächer (links) und die Bewertung (rechts).
Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).

2.3.2 Treibhausgasemissionen (Total)

Die Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Entsorgung sind in [Abb. 36](#) und [Abb. 38](#) dargestellt. In [Abb. 37](#) und [Abb. 39](#) sind die zugehörigen Bewertungen wiedergegeben. Ein hoher Wert weist auf hohe Emissionen bei Herstellung und Entsorgung hin und führt zu einer schlechten Bewertung.

In der Gruppe der Böden weist «B_Betonbelag» hohe Treibhausgasemissionen auf, sehr niedrige Emissionen ruft «B_Kiesbelag» hervor. Allerdings ist hier zu beachten, dass «B_Betonbelag» befahrbar ist und eine längere Lebensdauer aufweist. Wenn die Befahrbarkeit nicht zwingend erforderlich ist, ist damit «B_Kiesbelag» günstig. Da für den Rasen und die Wiese keine Werte existieren wird der Herstellungswert für Split angenommen. Dies gilt für den Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil. Beim Boden mit erhöhtem organischem Anteil wird kein Wert angegeben, da die Zusammensetzung und der Anteil möglicher organischer Stoffe zu unterschiedlich sind (siehe [Tabelle 13](#) im Anhang). Torf selber wird in Mooren abgebaut und der Torfabbau in Mooren ist in der Schweiz seit 1987 verboten.

Bei der Bewertung der Wandmaterialien, Dachmaterialien und Konstruktionen ist auf folgenden Punkt zu achten: wie in [Kapitel 5.1.2](#) dargestellt, berücksichtigt der Materialkatalog immer nur die Schichten, die für das städtische Mikroklima massgeblich sind. Bei gedämmten Bauteilen ist das von aussen bis (und mit) Dämmung, bei hinterlüfteten Materialien ist die trennende Schicht die Luftschicht. Bei einem direkten Vergleich zwischen den anderen Wandkonstruktionen mit «Hinterlüfteter Fassade» (HF) sind die Konstruktionen ohne Hinterlüftung im Nachteil. Dies gilt auch für die hinterlüfteten Steildachkonstruktionen. Ein Vergleich innerhalb der jeweiligen Gruppe ist damit sinnvoller.

Bei den Wandmaterialien weist die hinterlüftete Fassade mit PV (HF_Photovoltaik) die höchsten Emissionen auf, gefolgt von der Glasfassade (LB_Glasfassade) und vom Sonnenschutz (LB_Glasfassade_Sonnenschutz, Achtung: die Glasfassade ist hier wegen der trennenden Luftschicht nicht enthalten, der Wert wäre also noch höher) und den Sandwichbauteilen (LB_Sandwichpaneel). Das Material mit den tiefsten Emissionen ist die hinterlüftete Holzfassade (HF_Holzverkleidung).

Auch bei den Dachmaterialien ist ein direkter Vergleich zwischen den hinterlüfteten Steildachkonstruktionen und den Flachdächern methodisch nicht sinnvoll. Innerhalb der Gruppe der Flachdächer hat das Photovoltaikdach die höchsten Emissionen. Innerhalb der Gruppe der Steildachkonstruktionen weisen die pulverbeschichteten Metaldachkonstruktionen höhere Werte als die anderen Dächer auf.

Kommentar: Für das Material PV (HF_Photovoltaik und D_Photovoltaik) gibt es Angaben, die sich auf «Kilowatt Peak» beziehen. Unter der Annahme, dass für die Erzeugung von 1 kWp Nennleistung ca. 6 m² Modulfläche benötigt wird [\[16\]](#), können die Werte umgerechnet werden. Allerdings ist ein Vergleich mit den anderen Materialien trotzdem eher schwierig, da bei der negativen Bewertung der PV-Module ausser Acht gelassen wird, dass sie während ihrer Lebensdauer Strom produzieren.

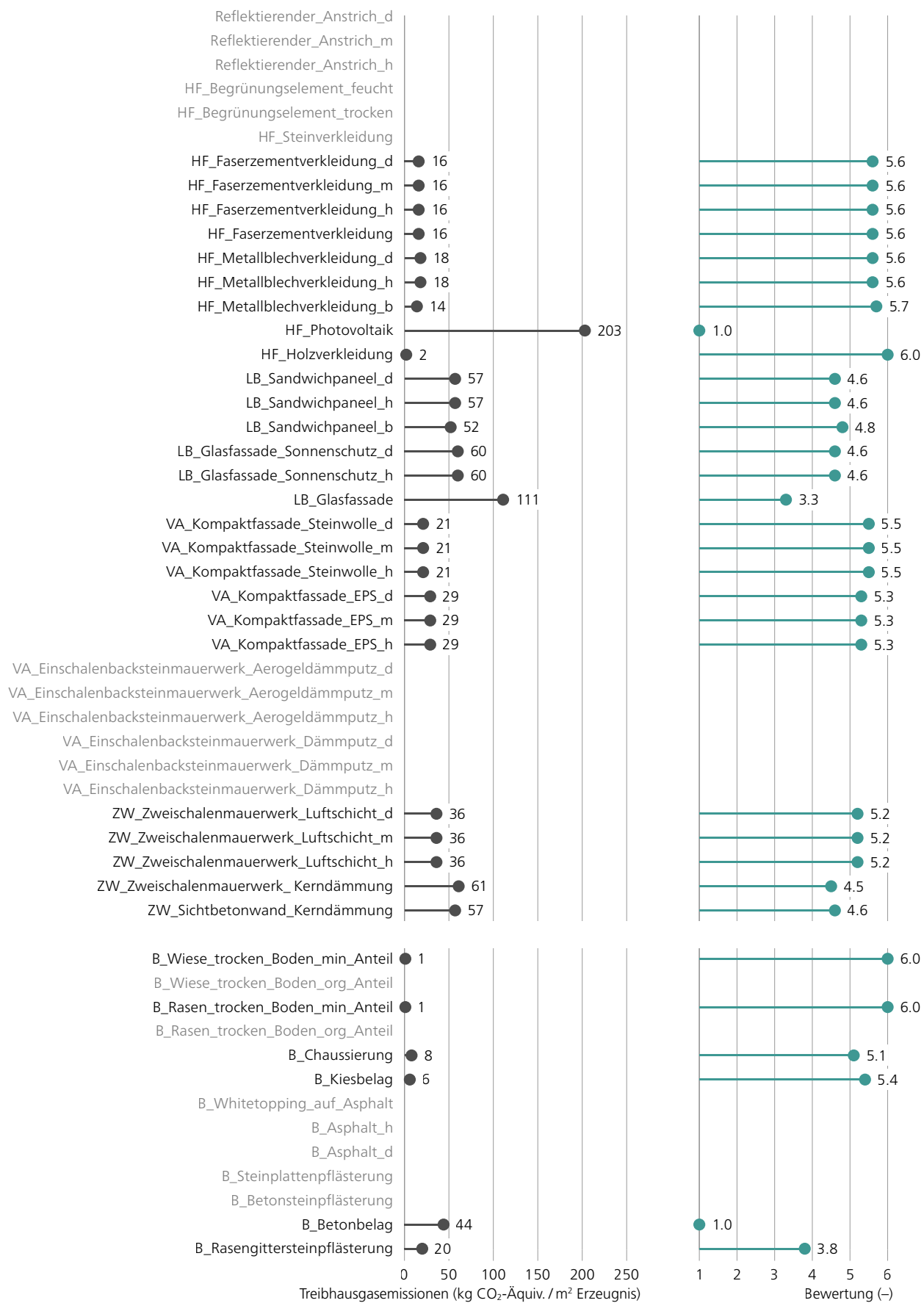


Abb. 36+37 Treibhausgasemissionen für Herstellung und Entsorgung Fassaden und Böden (links) und die Bewertung (rechts). Anmerkung HF: hier werden nur die Schichten bis zur Hinterlüftung berücksichtigt, bei den anderen Konstruktionen wird die Dämmung eingerechnet. Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis](#) und [Abb. 1](#).

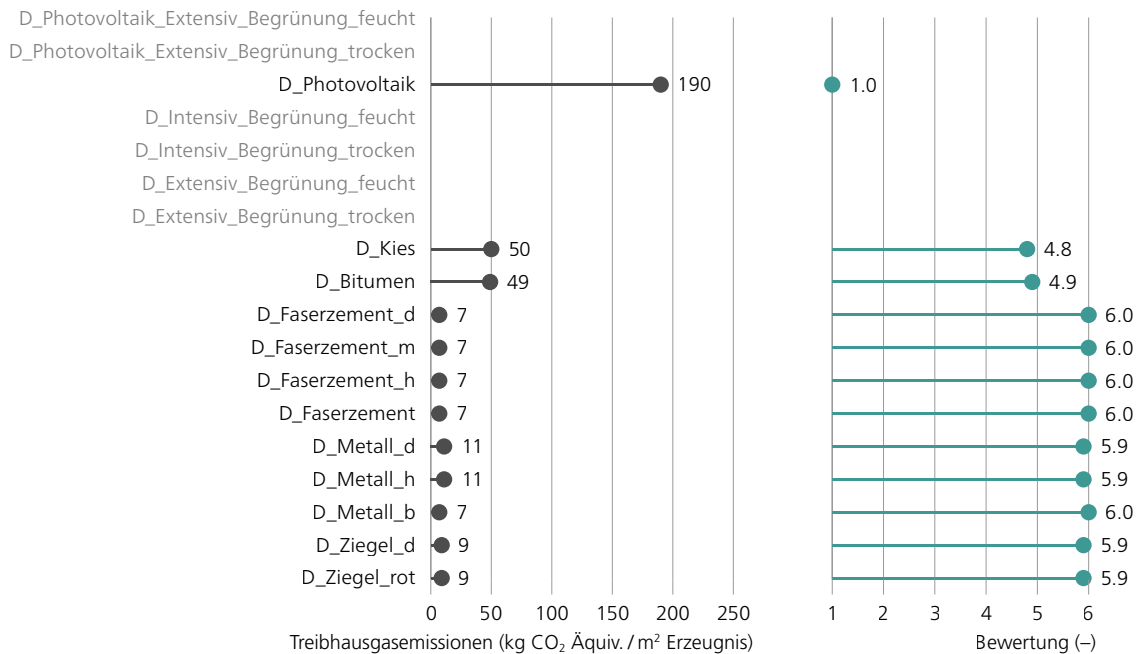


Abb. 38+39 Treibhausgasemissionen für Herstellung und Entsorgung Dächer (links) und die Bewertung (rechts). Anmerkung «D_Faserzement_», «D_Metall_» und «D_Ziegel_»: hier werden nur die Schichten bis zur Hinterlüftung berücksichtigt, bei den anderen Konstruktionen wird die Dämmung eingerechnet. Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis](#) und [Abb. 1](#).

2.4 Akustische Eigenschaften: Gewichtung Schallabsorptionsgrad

Den gewichteten Schallabsorptionsgrad zeigt [Abb. 40](#), die dazugehörige Bewertung ist in [Abb. 41](#) aufgeführt. Als Schallabsorptionsgrad wird das Verhältnis von absorbierte zu auffallender Schallenergie definiert. Die Gewichtung berücksichtigt die Nachhallzeit und die frequenzabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs. Ein hoher Wert (der Maximalwert liegt bei 1) weist auf eine den Schall dämpfende Wirkung im Strassenraum hin. Die frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade, aus denen der gewichtete Schallabsorptionsgrad berechnet wird, sind für jedes Material in der Datensammlung ([Kapitel 4](#)) aufgeführt.

Bei den Bodenkonstruktionen sind offenporige Beläge, wie «B_Kiesbelag» und «B_Chaussierung» vorteilhaft. Geschlossenporige Baustoffe, wie «B_Betonbelag» und «B_Aspphalt», sind eher schallhart.

Die beste Wandkonstruktion ist die hinterlüftete, begrünte Fassade (HF_Begrünungselement), bzw. die hinterlüftete Fassade mit einer Holzverkleidung (HF_Holzverkleidung).

Dächer sind am städtischen Schallfeld eher untergeordnet beteiligt und der Schallabsorptionsgrad wird hier daher als nicht relevant eingestuft.

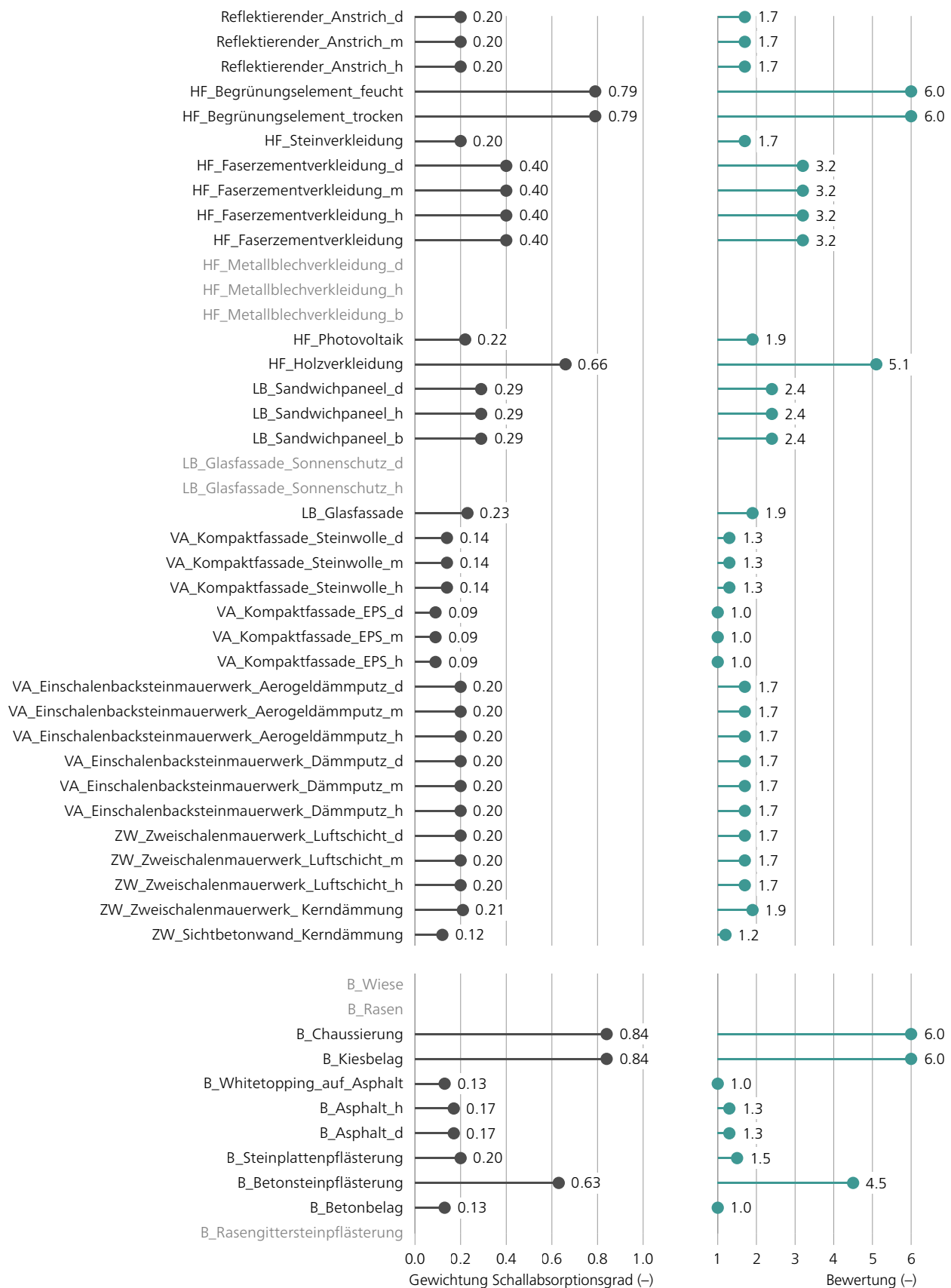


Abb.40+41 Gewichtung Schallabsorptionsgrad Fassaden und Böden (links) und die Bewertung (rechts).
Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1.](#)

2.5 Versickerungsfähigkeit (Böden und Dächer): Abflussbeiwert

Den Abflussbeiwert für die Bodenkonstruktionen zeigen [Abb. 42](#) und [Abb. 44](#), die Bewertung [Abb. 43](#) und [Abb. 45](#). Dieser Parameter beschreibt den Teil eines Niederschlagsereignisses, der direkt zum Abfluss gelangt im Verhältnis zum Gesamtniederschlag. Ein tiefer Abflussbeiwert weist auf eine gute Versickerung hin, was zum Beispiel für Schwammstadtkonzepte vorteilhaft ist.

Bei den Böden haben einen gut bewerteten Abflussbeiwert die Konstruktionen «B_Rasen», «B_Wiese» und «B_Rasengittersteinpflasterung». Im Mittelfeld liegen «B_Kiesbelag» und «B_Chaussierung». Es überrascht wenig, dass geschlossene Oberflächen (wie z. B. «B_Betonbelag», «B_Asphalt») schlecht bewertet werden.

Bei den Dächern weist das intensive Gründach den tiefsten Abflussbeiwert auf, gefolgt von den extensiv begrünten Dächern. Dächer mit geschlossenen Oberflächen haben einen hohen Abflussbeiwert.

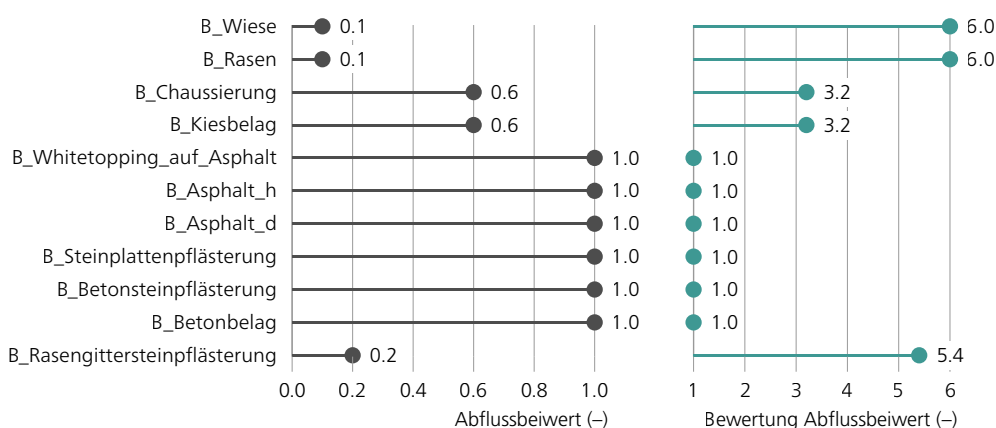


Abb. 42+43 Abflussbeiwert für alle Bodenkonstruktionen (links) und die Bewertung (rechts).

Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).

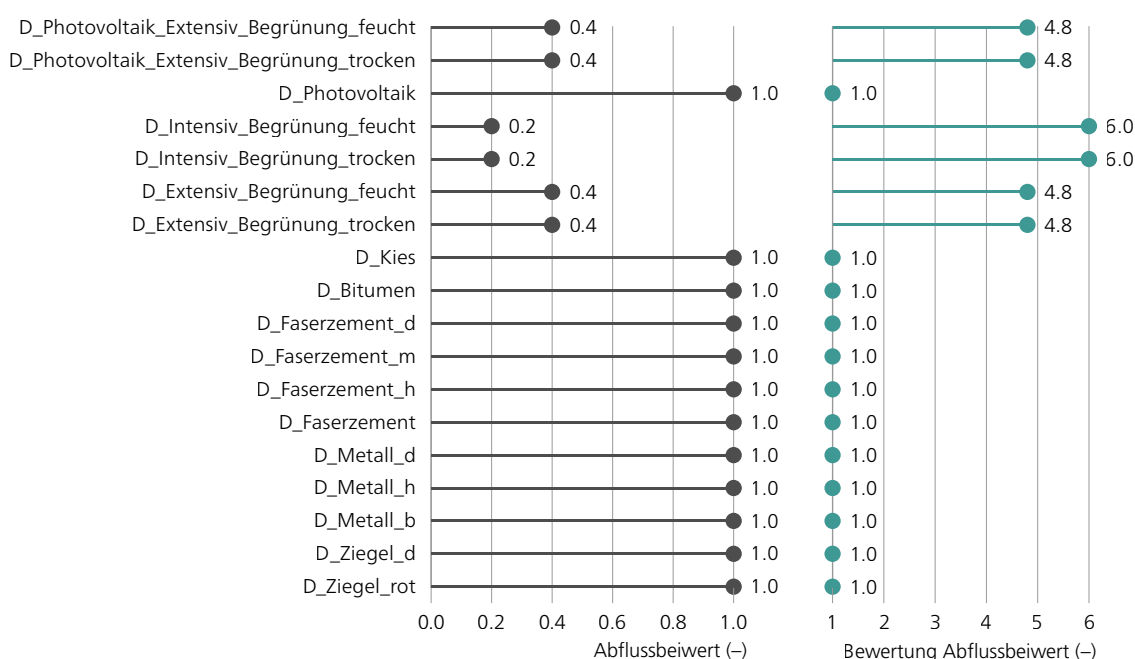
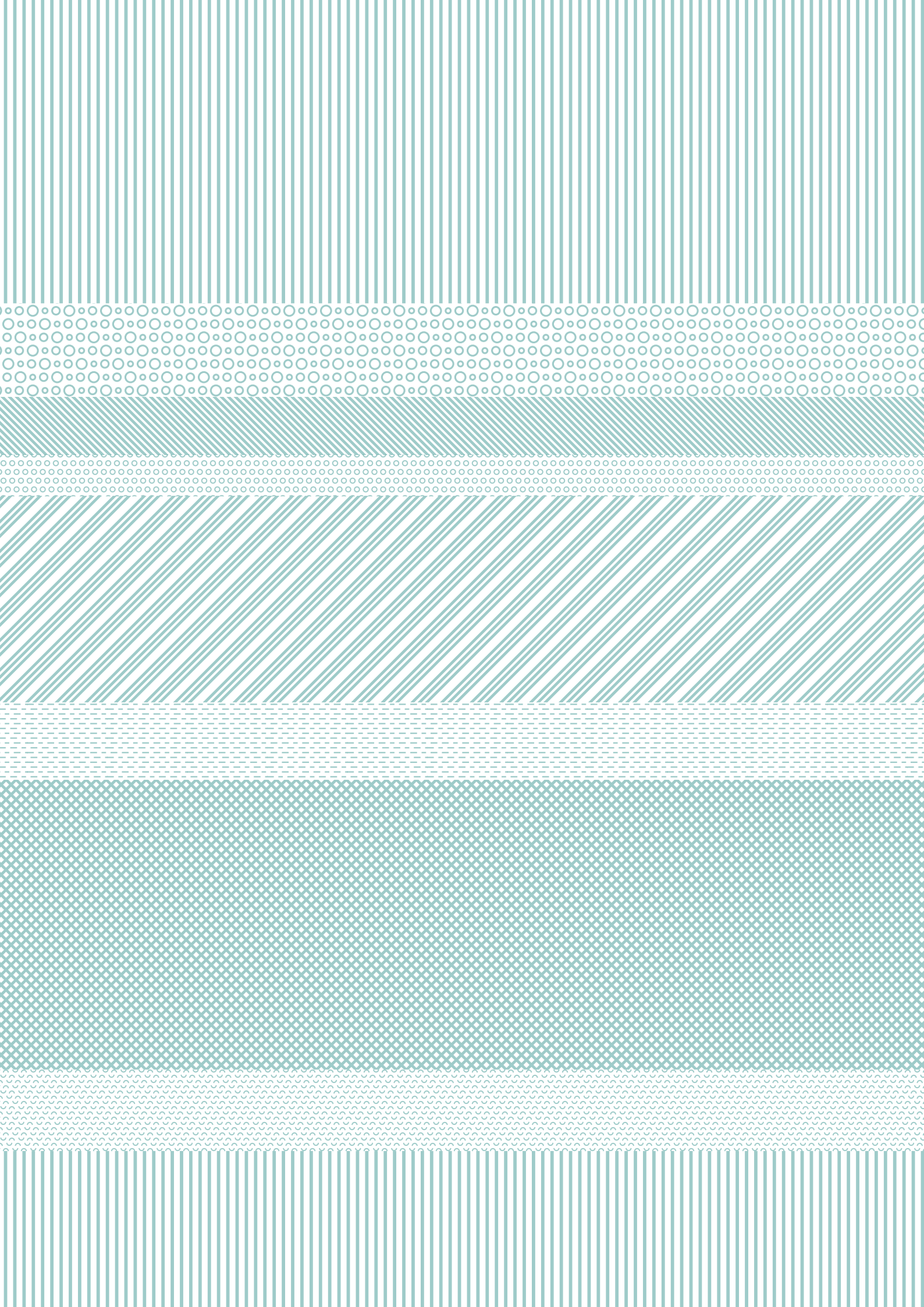


Abb. 44+45 Abflussbeiwert für alle Dächer (links) und die Bewertung (rechts).

Verwendete Abkürzungen: siehe [Abkürzungsverzeichnis und Abb. 1](#).



3 Gesamtbewertung über alle Parameter

In diesem Kapitel wird eine Gesamtbewertung der detailliert betrachteten acht, bzw. neun Parameter vorgenommen. Hierbei werden die Einzelbewertungen addiert. Es wird keine Gewichtung der untersuchten Parameter vorgenommen. Die Gesamtbewertung ist damit bewusst einfach gehalten. Sie soll lediglich einen ersten Anhaltspunkt für die Einschätzung des Materials geben.

Fehlende Werte werden mittels einer Potentialabschätzung berücksichtigt. Informationen dazu finden sich in der Infobox «Umgang mit fehlenden Parametern (Potentialabschätzung)» in [Kapitel 1.2.2](#). Eine detaillierte Beschreibung enthält [Kapitel 5.1.5](#).

3.1 Wände

Bei den Wandkonstruktionen können insgesamt 48 Punkte erreicht werden. Die Minimalbewertung liegt bei 8 Punkten (fehlende Angaben werden mit «1» bewertet). Eine Auflistung der untersuchten Wandkonstruktionen findet sich in [Kapitel 1.1](#).

3.1.1 Zweischalige Wandkonstruktionen

Das Material mit der besten Gesamtbewertung ist «ZW_Zweischalenmauerwerk_Kerndämmung» (siehe [Abb. 46](#)). Dies liegt an einer guten Bewertung im Bereich Lebensdauer und Reflexion (Bewertung 6.0 und 5.7), sowie mittleren Werten im Bereich Albedo und SRI (jeweils Bewertung 4.2). Die Wand mit der tiefsten Punktzahl ist «ZW_Sichtbetonwand_Kerndämmung». Tiefe Bewertungen erreicht diese Wandkonstruktion im Bereich Akustik und der Aussenlufttemperatur in der Nacht (Bewertung 1.2 und 1.7).

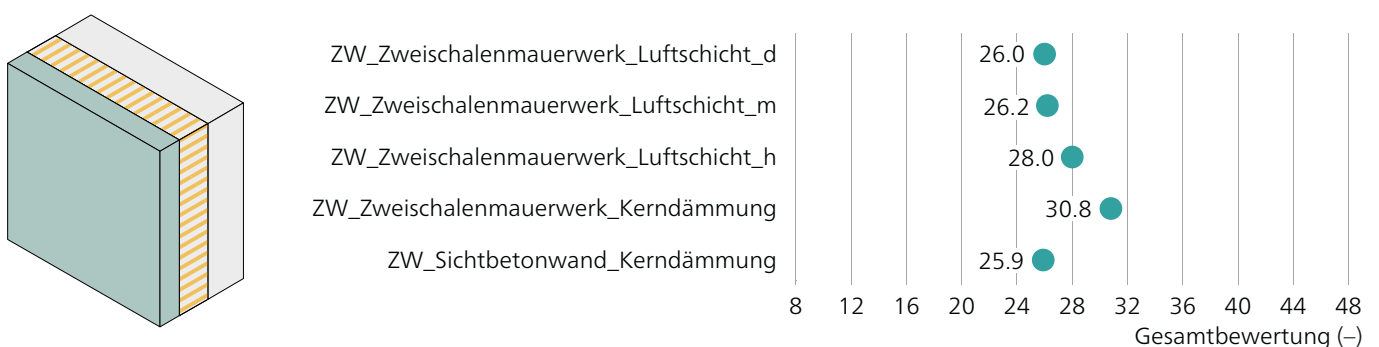


Abb. 46 Gesamtbewertung zweischalige Wandkonstruktionen. Verwendete Abkürzungen: ZW = Zweischalige Wandkonstruktionen, m = Farbgebung mittel ($\alpha = 0.45$), h = Farbgebung hell ($\alpha = 0.75$), d = Farbgebung dunkel ($\alpha = 0.26$). Eine Potentialabschätzung ist nicht notwendig, da alle Angaben verfügbar sind.

3.1.2 Verputzte Aussendämmung

In dieser Gruppe erhält das Material «VA_Kompaktfassade_Steinwolle_h» ([Abb. 47](#)) die beste Gesamtbewertung. Zurückzuführen ist dies auf hohe Werte in den Bereichen Albedo und SRI (Bewertung 5.6 und 5.3). Tiefe Werte sind im Bereich Akustik und PET (Tag), (beide Bewertung 1.3) zu verzeichnen.

Das Material mit der schlechtesten Bewertung ist eine mit dunklem Dämmputz verputzte Backsteinwand (VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Dämmputz_d). Dies ist auf eine ungünstige Bewertung der Akustik und der Albedo (Bewertung 1.7 und 2.3) zurückzuführen. Allerdings ist sowohl beim Dämmputz als auch beim Aerogeldämmputz in der Bewertung eine hohe Unsicherheit (Potentialabschätzung) enthalten, da es keine Angaben zur Lebensdauer und zu den Treibhausgasemissionen gibt.

Es zeigt sich, dass eine helle Farbgebung in der Gesamtbewertung besser abschneidet, da sie bei den Parametern Albedo und SRI deutlich bessere und bei der Aussenlufttemperatur in der Nacht etwas bessere Bewertungen erhält als dieselbe Konstruktion mit einer dunklen Farbgebung. Die schlechtere Bewertung im Bereich der PET (Tag) und der Blendung bei hellen Oberflächen fällt bei der gewählten Betrachtungsweise (keine spezielle Gewichtung der Parameter) weniger stark ins Gewicht.

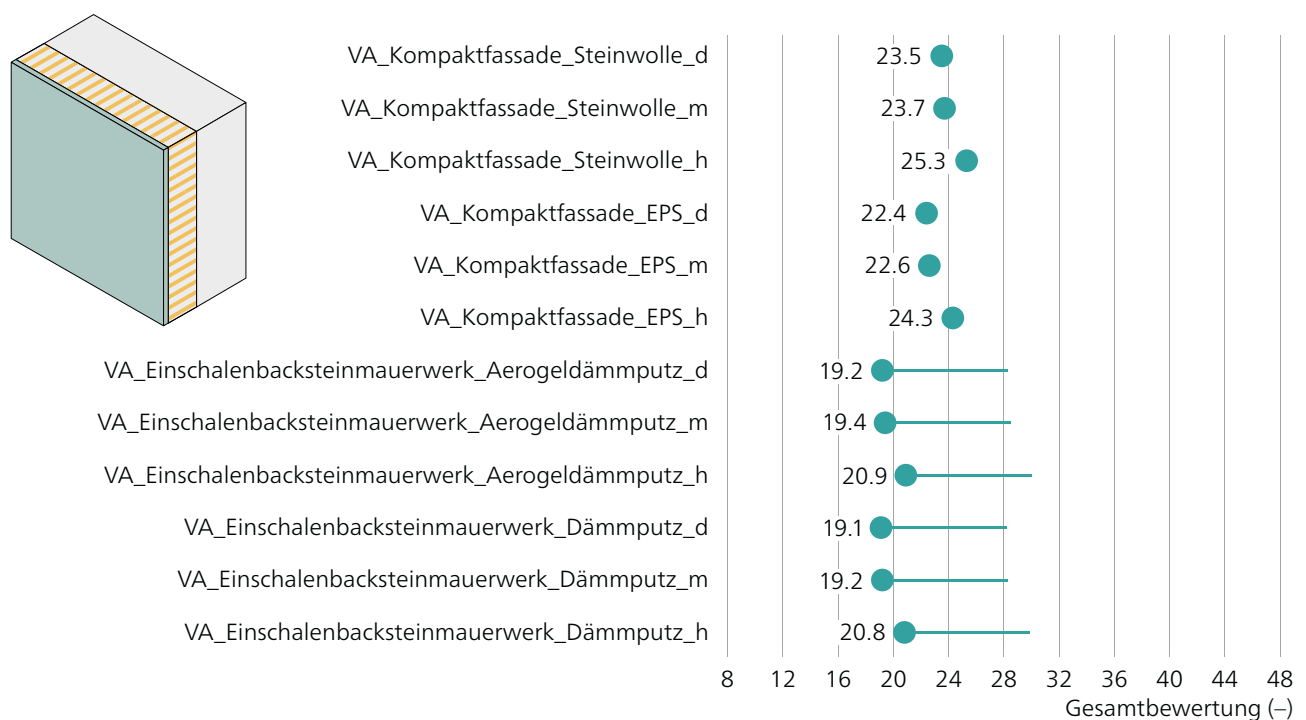


Abb. 47 Gesamtbewertung verputzte Aussendämmung. Verwendete Abkürzungen: VA = Verputzte Aussendämmung, EPS = Expandiertes Polystyrol, m = Farbgebung mittel ($\alpha = 0.45$), h = Farbgebung hell ($\alpha = 0.75$), d = Farbgebung dunkel ($\alpha = 0.26$). Zur Potentialabschätzung (durchgezogene Linie hinter dem Wertpunkt), siehe [Abb. 4](#) und die dazugehörige Infobox.

3.1.3 Glassfassade/Leichtbau

In dieser Gruppe (mit Ausnahme von «LB_Sandwichpaneel_b») erreichen die Bewertungen eine ähnlich hohe Punktzahl (Gesamtbewertung zwischen 22.6 und 25.8). Die am besten bewerteten Materialien sind die Glasfassade mit hellem Sonnenschutz (LB_Glasfassade_Sonnenschutz_h) und das Sandwichpaneel mit heller Farbgebung (LB_Sandwichpaneel_h, [Abb. 48](#)). Gute Bewertungen liegen bei der Albedo und beim SRI (jeweils Bewertung 5.1) vor, eher schlecht bewertet ist der Bereich visuelle Reflexion (Bewertung 1.0). Bei der Glasfassade mit Sonnenschutz ist auch die Lebensdauer mit 1.0 schlecht bewertet, bei «LB_Sandwichpaneel_h» liegen dazu keine Angaben vor. Die schlechteste Bewertung erhält das blanke Sandwichpaneel. Hier sind die Bewertungen für den SRI (1.1) und Blendung (2.0) tief.

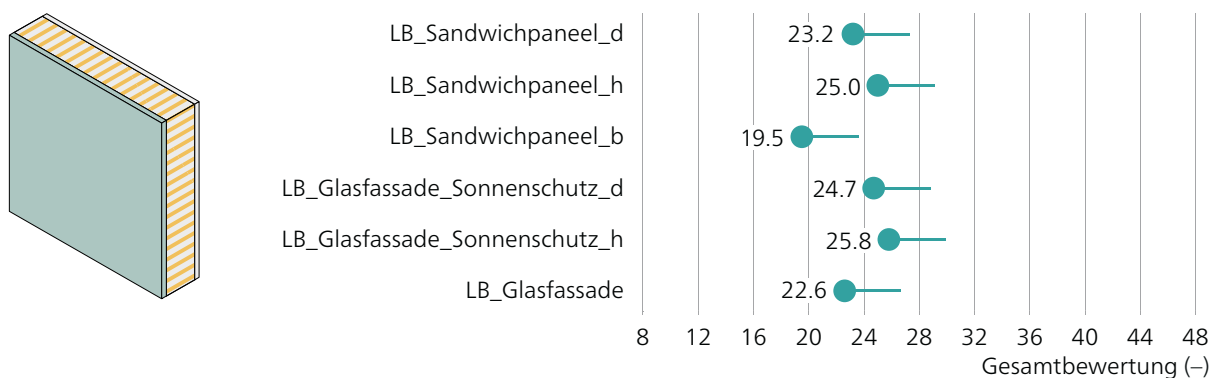


Abb. 48 Gesamtbewertung Glassfassade/Leichtbau. Verwendete Abkürzungen: LB = Glasfassade/Leichtbau, m = Farbgebung mittel ($\alpha = 0.45$), h = Farbgebung hell ($\alpha = 0.75$), d = Farbgebung dunkel ($\alpha = 0.26$), b = blank. Zur Potentialabschätzung (durchgezogene Linie hinter dem Wertpunkt), siehe [Abb. 4](#) und die dazugehörige Infobox.

3.1.4 Hinterlüftete Fassade

In dieser Materialgruppe erhält «HF_Faserzementverkleidung» die beste Gesamtbewertung (siehe [Abb. 49](#)). Dies liegt hauptsächlich an guten Bewertungen für die Lebensdauer (Bewertung 6.0) und die Treibhausgasemissionen (5.6). Da die natureigene Farbe von Faserzement zwischen den anderen untersuchten Farbtönen «hell» und «mittel» liegt, erhält das Material jeweils Bewertungen zwischen 4.2 und 4.8 in den Bereichen SRI, Albedo und Blendung. Beim hellen Farbton wird im Gegenteil dazu die Blendung schlecht bewertet, beim mittleren Farbton werden für SRI und Albedo tiefere Bewertungen erzielt. Das Material mit der schlechtesten Gesamtbewertung (19.6 Punkte) ist eine hinterlüftete PV-Fassade (HF_Photovoltaik). Tiefe Bewertungen gibt es für die Bereiche Treibhausgasemissionen (Bewertung 1.0), den SRI (Bewertung 1.1) und Albedo (Bewertung 1.6). Trotz der tiefen Gesamtbewertung muss berücksichtigt werden, dass die Fassade im Laufe ihrer Lebensdauer Strom produziert. Die zweitschlechteste Gesamtbewertung erhalten die Fassaden mit Steinverkleidung (HF_Steinverkleidung) und das ausgetrocknete Begrünungselement. Für «HF_Steinverkleidung» liegt die tiefe Gesamtpunktzahl an der tiefen Bewertung für θ_a in der Nacht und die Akustik (Bewertung 1.6, respektive 1.7). Für das trockene Begrünungselement liegt die schlechte Bewertung hauptsächlich an der hohen Unsicherheit (siehe Potentialabschätzung), da für dieses Material keine Angaben in den Bereichen Lebensdauer und Treibhausgasemissionen verfügbar sind und auch an der tiefen Bewertung für die PET (Bewertung 2.4). Eine sehr gute Bewertung 6.0 erhält das Material für die Akustik. Für das feuchte Begrünungselement ergibt sich durch die bessere Bewertung für PET (Tag) und θ_a in der Nacht eine höhere Gesamtpunktzahl von 27.9 statt 23.0 Punkten. Ergänzend zur Gesamtbewertung muss berücksichtigt werden, dass durch die Begrünung CO₂ gebunden wird.

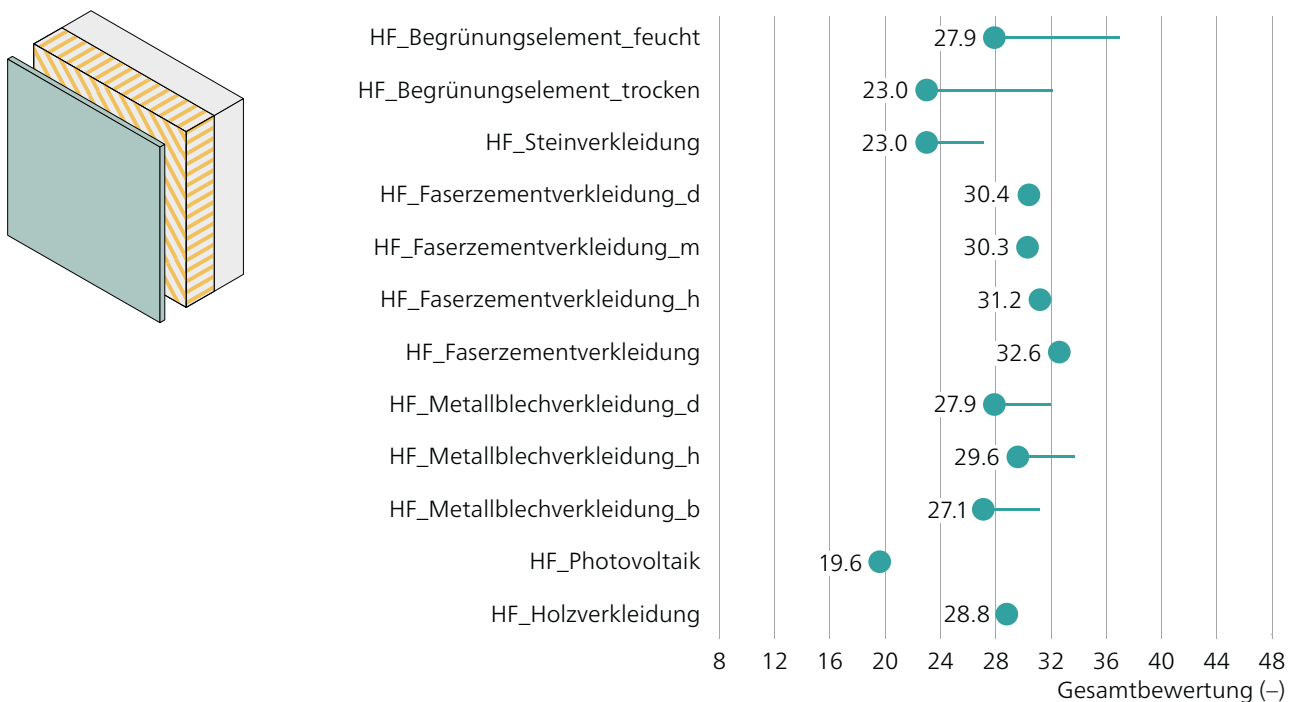


Abb. 49 Gesamtbewertung hinterlüftete Fassade. Verwendete Abkürzungen: HF = Hinterlüftete Fassade, m = Farbgebung mittel ($\alpha = 0.45$), h = Farbgebung hell ($\alpha = 0.75$), d = Farbgebung dunkel ($\alpha = 0.26$). Zur Potentialabschätzung (durchgezogene Linie hinter dem Wertpunkt), siehe [Abb. 4](#) und die dazugehörige Infobox.

3.1.5 Reflektierende Anstriche

In [Abb. 50](#) werden unterschiedlichen Farbvarianten eines reflektierenden Anstrichs miteinander verglichen. Bei der Bewertung besteht eine Unsicherheit, die darauf zurückzuführen ist, dass es keine Angaben zur Lebensdauer und zu den Treibhausgasemissionen gibt. Am besten werden die Anstriche mit der mittleren und hellen Farbgebung bewertet.

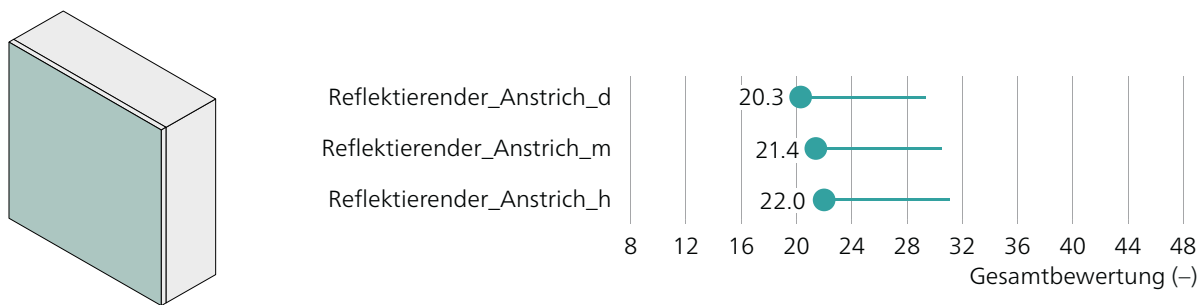


Abb. 50 Gesamtbewertung reflektierende Anstriche Wand. Zur Farbgebung: m: $\alpha = 0.69$, h: $\alpha = 0.81$, d: $\alpha = 0.42$. Zur Potentialabschätzung (durchgezogene Linie hinter dem Wertpunkt), siehe [Abb. 4](#) und die dazugehörige Infobox.

3.2 Böden

In dieser Gruppe werden neun Parameter bewertet. Im Idealfall kann ein Material also 54 Punkte erreichen, im schlechtesten Fall 9 Punkte. Eine Auflistung der untersuchten Bodenkonstruktionen findet sich in [Kapitel 1.1](#). Bei der Bewertung kann zwischen den nichtbegrünt und den begrünten Böden unterschieden werden.

Die Gesamtbewertung der nichtbegrünt Böden auf [Abb. 51](#) zeigt, dass der Belag «B_Kies» die besten Werte aufweist (30.6). Besonders gute Bewertungen erreicht dieses Material bei den Parametern Akustik, Reflexion (Bewertung 6.0, respektive 5.9) und Treibhausgasemissionen (5.4). Nachteilig an diesem Material sind allerdings die Lebensdauer und die PET (Tag), (Bewertung 1.0 und 1.3). Ähnlich gut bewertet ist «B_Chassierung». Gute Bewertungen erreicht dieses Material bei der Akustik (Bewertung 6.0), und den Parametern SRI (5.6) und Treibhausgasemissionen (5.1). Nachteilig an diesem Material sind allerdings die hohe Blendung, eine kurze Lebensdauer (jeweils Bewertung 1.0) und die PET (Tag), (Bewertung 1.3). Der Bodenbelag mit der tiefsten Gesamtbewertung ist «B_Aspphalt_d». Nachteilig sind hier der SRI, der tiefe Abflussbeiwert (jeweils Bewertung 1.0), die Albedo und θ_a in der Nacht (Bewertung 1.2 und 1.4).

Von den begrünten Varianten auf [Abb. 51](#) weisen Böden mit erhöhtem mineralischem Anteil eine sehr gute Bewertung auf. Am besten schneiden die feuchten Begrünungen mit Bäumen ab, gefolgt von den trockenen Begrünungen mit Bäumen. Diese Differenz ergibt sich aus der besseren Bewertung für die PET (Tag) und θ_a in der Nacht. Die Wiese wird insgesamt geringfügig schlechter bewertet als der Rasen, dies liegt an tieferen Bewertungen für den SRI und die Albedo. Beim Rasen und der Wiese fehlen Angaben zur Akustik und zur Lebensdauer, daher besteht eine hohe Unsicherheit bei der Bewertung (siehe Potentialabschätzung). Bei den Böden mit erhöhtem organischem Anteil kann keine Herstellungsenergie angenommen werden, da die Zusammensetzung und der Anteil möglicher organischer

Stoffe zu unterschiedlich sind (siehe [Tabelle 13](#) im Anhang). Der Abbau von Torf selber ist in der Schweiz verboten und das Torfausstiegskonzept des Bundes lehnt einen Import ab (siehe auch [«Infobox: Böden für Grünflächen»](#)).

Die tiefsten Bewertungen treten bei den begrüneten Varianten für die trockenen Begrünungen ohne Bäume auf. Tiefe Bewertungen werden in den Bereichen PET und θ_a erreicht (siehe [«Infobox: Trockene Grünflächen und Dachbegrünungen»](#), [Kapitel 2.1.1](#)).

Bei allen Begrünungen liegt eine sehr gute Bewertung beim Abflussbeiwert vor. Ergänzend muss auch berücksichtigt werden, dass durch die Begrünung CO_2 gebunden wird.

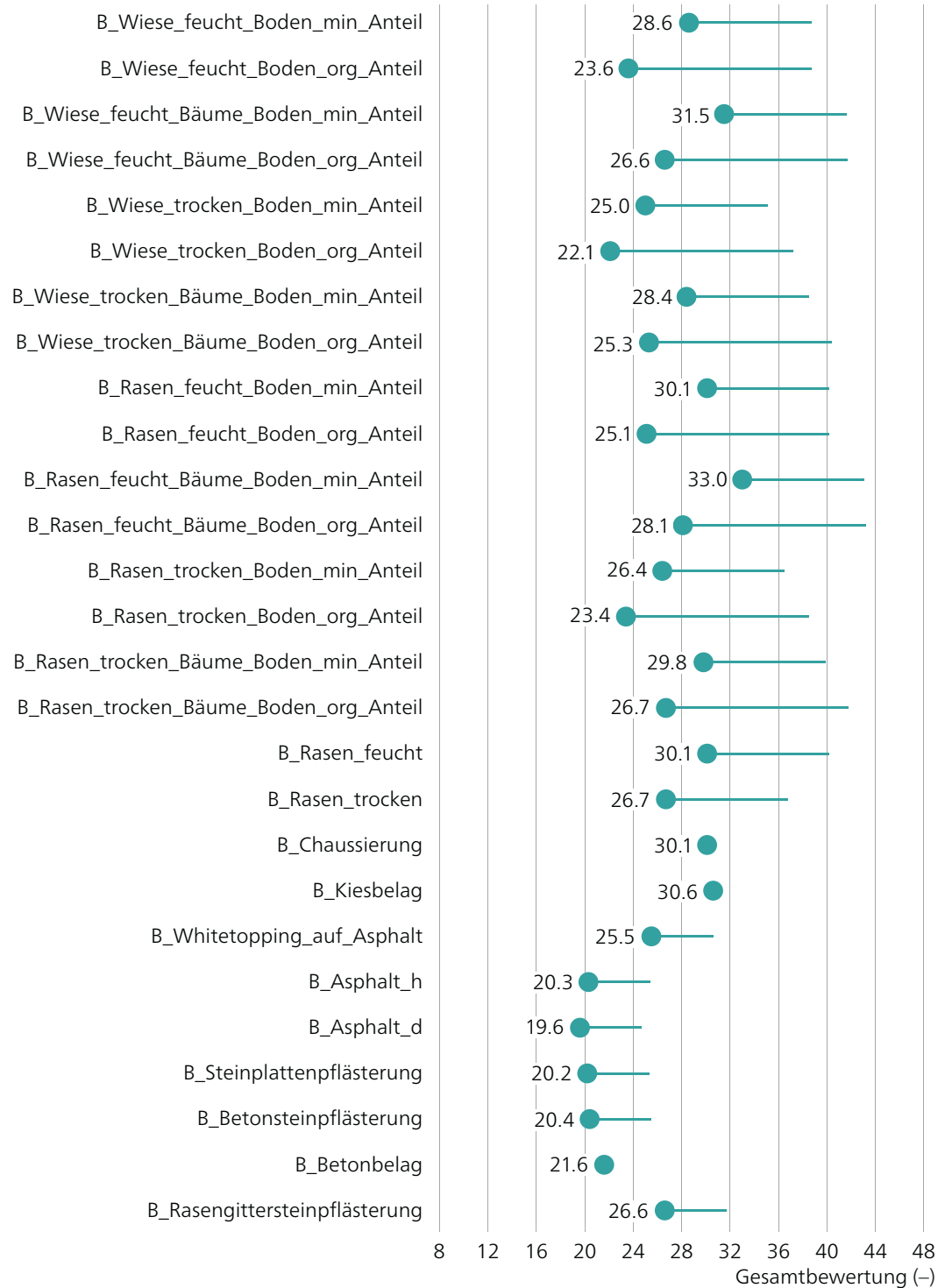
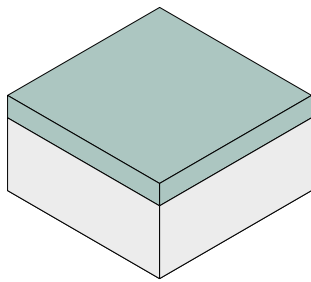


Abb. 51 Gesamtbewertung Bodenmaterialien. Verwendete Abkürzungen: B = Umgebung Boden. Zur Potentialabschätzung (durchgezogene Linie hinter dem Wertpunkt) siehe [Abb. 4](#) und die dazugehörige Infobox.

3.3 Dächer

In dieser Gruppe werden acht Parameter bewertet, da hier die Akustik entfällt. Die Spannweite der Bewertung reicht also von 48 Punkten im besten Fall bis zu minimal 8 Punkten.

Auch bei den Dächern ist zwischen hinterlüfteten (D_Ziegel_, D_Faserzement_ und D_Metall_) sowie nicht hinterlüfteten Konstruktionen (Flachdächern) zu unterscheiden. Da der Materialkatalog immer nur die Schichten berücksichtigt, welche für das städtische Mikroklima massgeblich sind, sind die hinterlüfteten Materialien, was die Treibhausgasemissionen angeht, im Vorteil. In der Gruppe der hinterlüfteten Dächer wird das rote Ziegeldach (D_Ziegel_rot) am besten bewertet. Eine ähnlich gute Bewertung erhält die Faserzementdeckung (D_Faserzement). Beide Materialien haben sehr gute Werte im Bereich der Lebensdauer (Bewertung 6.0), bei den Treibhausgasemissionen (5.9) und der Reflexion (5.7), bzw. Albedo (5.1). Eine eher tiefe Bewertung erhält das dunkle Metaldach (D_Metall_d). Dies liegt an einer tiefen Bewertung der Albedo, des SRI und des Abflussbeiwertes (Bewertung jeweils 1.0).

In der Gruppe der Flachdächer schneiden die feuchten intensiven und extensiven Begrünungen sehr gut ab (D_Extensiv_Begrünung_feucht und D_Intensiv_Begrünung_feucht). Der Grund ist die hohe Bewertung der θ_a am Tag und in der Nacht und vom Abflussbeiwert (Bewertung zwischen 4.8 und 6.0). Die minimal bessere Bewertung der extensiven Begrünung ist auf die längere Lebensdauer zurückzuführen. Die tiefste Gesamtbewertung weisen das Photovoltaikdach (D_Photovoltaik) und das Nacktdach mit Bitumendeckung auf (D_Bitumen). Beim Photovoltaikdach werden die Treibhausgasemissionen, der Abflussbeiwert, θ_a in der Nacht (jeweils 1.0) und der SRI (1.1) sehr schlecht bewertet. Bei den Treibhausgasemissionen ist jedoch zu beachten, dass das Photovoltaikdach während seiner Lebensdauer Strom produziert. Von der Bewertung her ist eine Kombination aus einem Photovoltaikdach mit einem extensiv begrünten Dach (D_Photovoltaik_Extensiv_Begrünung) durchaus sinnvoll.

Beim Bitumendach werden die Lebensdauer, der Abflussbeiwert und die PET (Tag) mit jeweils einem Wert von 1.0 tief bewertet.

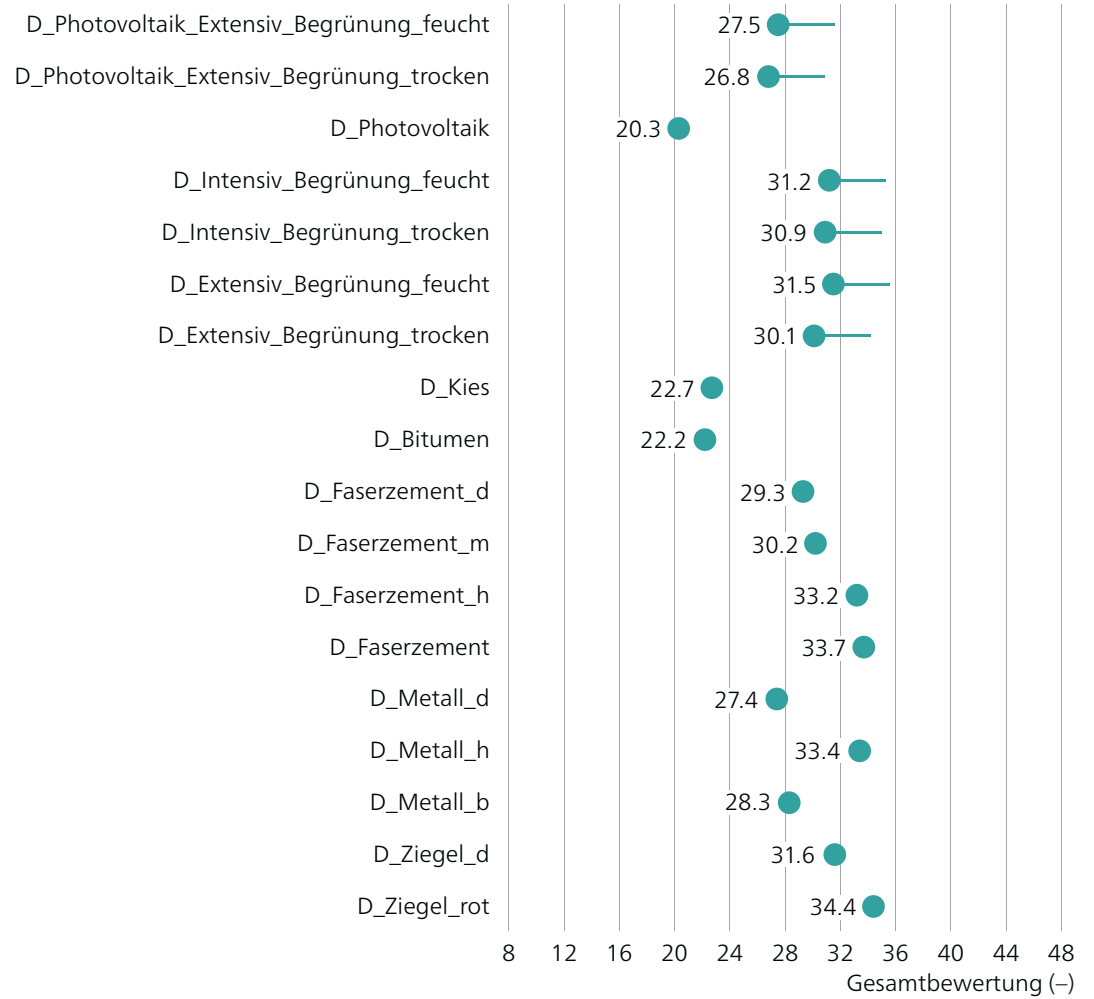
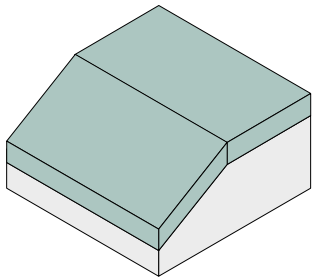


Abb. 52 Gesamtbewertung Dachmaterialien. Verwendete Abkürzungen:
D = Dach. Zur Potentialabschätzung (durchgezogene Linie hinter dem Wertpunkt) siehe [Abb. 4](#) und die dazugehörige Infobox.

3.4 Zusammenfassung

3.4.1 Wände

In [Abb. 53](#) ist die Gesamtbewertung für alle Wandkonstruktionen aus [Abb. 46](#), [Abb. 47](#), [Abb. 48](#) und [Abb. 50](#) (ausser den hinterlüfteten Fassaden, HF aus [Abb. 49](#)) in der Übersicht gezeigt. In [Abb. 49](#) werden HF getrennt dargestellt, da, wie in [Kapitel 5.1.2](#) gezeigt, der Materialkatalog immer nur die Schichten berücksichtigt, welche für das städtische Mikroklima massgeblich sind. Bei gedämmten Bauteilen sind das die Schichten bis und mit Dämmung, bei hinterlüfteten Materialien ist die trennende Schicht die Luftschicht. Damit sind beim Gesamtvergleich die hinterlüfteten Materialien, was die Treibhausgasemissionen angeht, im Vorteil. Das Material mit der besten Bewertung stammt trotzdem nicht aus dieser Gruppe, sondern ist die zweischalige Backsteinwand mit Kerndämmung (ZW_Zweischalenmauerwerk_Kerndämmung, 30.8 Punkte). Das am zweitbesten bewertete Material ist zweischaliges Mauerwerk mit Hinterlüftung und hellem Putz (ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschicht_h, 28.0 Punkte). In der Gruppe der verputzten Aussendämmungen erhält die hell verputzte, mit Steinwolle gedämmte Betonwand (VA_Kompaktfassade_Steinwolle_h, 25.3 Punkte) die beste Gesamtbewertung. In der Gruppe Leichtbau und Glasfassaden sind die Gesamtbewertungen in einem ähnlichen Bereich. Das hier am besten bewertete Material ist die Glasfassade mit hellem Sonnenschutz (LB_Glasfassade_Sonnenschutz_h, 25.8 Punkte).

In der Gruppe der hinterlüfteten Fassaden ([Abb. 49](#)) weist die Faserzementverkleidung die höchste Bewertung auf (HF_Faserzementverkleidung, 32.6 Punkte).

3.4.2 Böden

In der Gruppe der nichtbegrünten Böden ([Abb. 51](#)) erhalten die Beläge «B_Kiesbelag» (30.6 Punkte) und «B_Chaussierung» (30.1 Punkte) eine gute Bewertung. Bei den begrünten Böden weisen die feuchten Begrünungen auf Böden mit erhöhtem mineralischem Anteil mit Bäumen die besten Werte auf (B_Rasen_feucht_Bäume_Boden_min_Anteil, 33.0 Punkte; B_Wiese_feucht_Bäume_Boden_min_Anteil, 31.5 Punkte).

3.4.3 Dächer

Auch hier wird zwischen hinterlüfteten Dächern und den gedämmten Flachdächern unterschieden. In der Gruppe der hinterlüfteten Dächer werden das rote Ziegeldach (D_Ziegel_rot, 34.4 Punkte) und das Faserzementdach (D_Faserzement, 33.7 Punkte) am besten bewertet. In der Gruppe der Flachdachkonstruktionen schneiden die feuchten, intensiven und extensiven Begrünungen sehr gut ab (D_Extensiv_Begrünung_feucht, 31.5 Punkte; D_Intensiv_Begrünung_feucht, 31.2 Punkte).

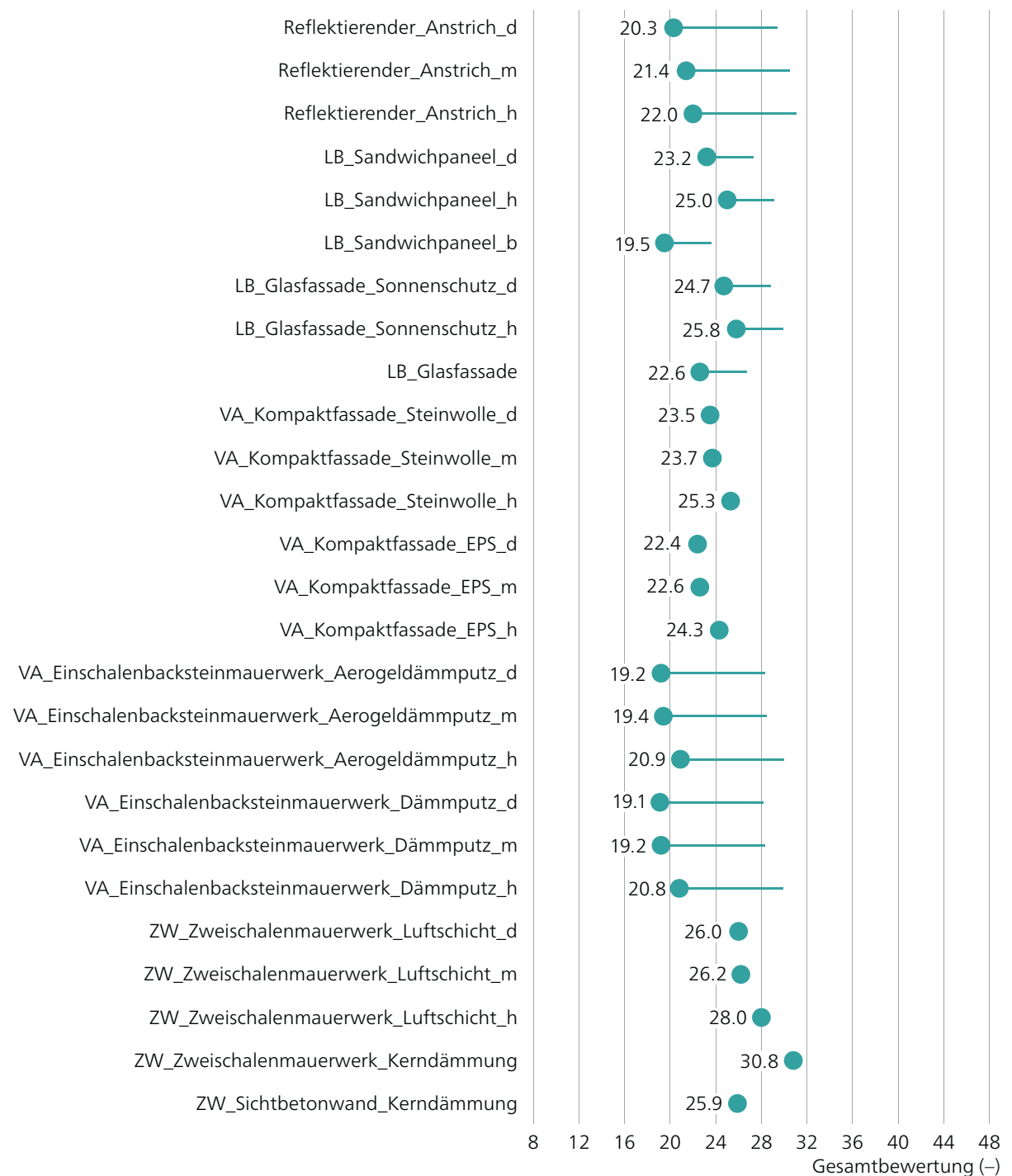


Abb. 53 Gesamtbewertung Wandkonstruktionen (ohne hinterlüftete Fassaden). Zur Potentialabschätzung (durchgezogene Linie hinter dem Wertpunkt) siehe [Abb. 4](#) und die dazugehörige Infobox.

4 Datensammlung

4.1 Zweischalige Wandkonstruktionen

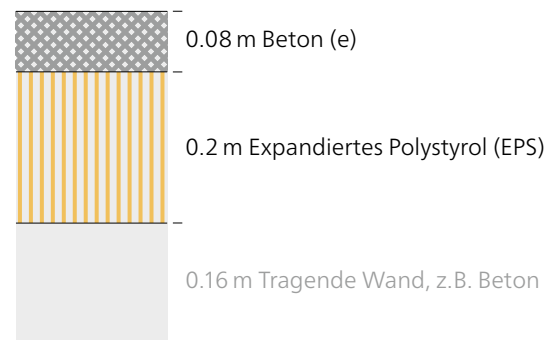
4.1.1 Sichtbetonwand mit Kerndämmung (ZW_Sichtbetonwand_Kerndämmung)

Ansicht



Quelle: Wesley Tingey auf Unsplash

Aufbau



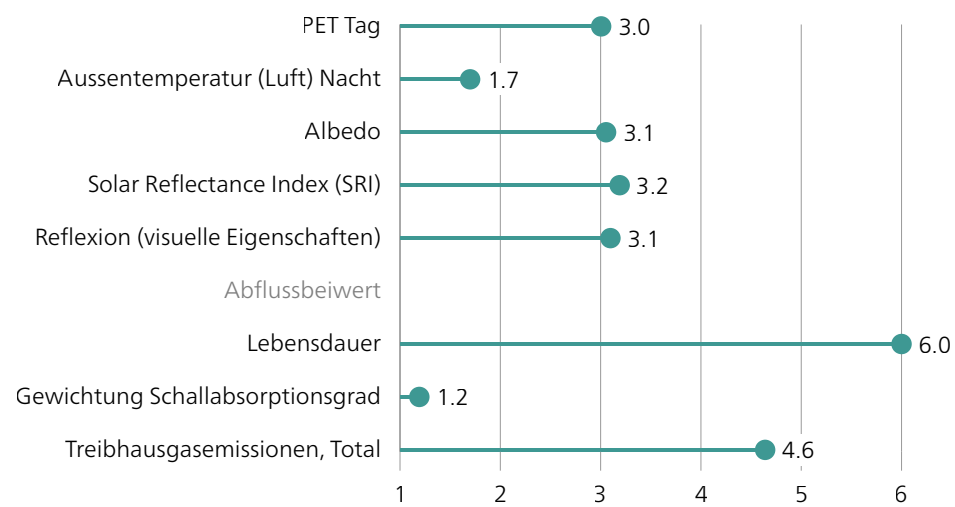
Materialdaten

Beton, hellgrau

PET Tag	°C	37.3
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.9
Albedo	–	0.38
Solar Reflectance Index (SRI)	–	44
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.50
Abflussbeiwert	–	n.a.
Lebensdauer	a	50
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.12
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	56.8

Bewertung

Beton, hellgrau



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			
			Beton, hellgrau		EPS	
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert
Density (Rohdichte)	ρ	kg m ⁻³	2'400	0.080	192.00	15
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	1.06			
		J kg ⁻¹ K ⁻¹	1'060		1'450	
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	MJ m ⁻³ K ⁻¹	2.54			
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	W m ⁻¹ K ⁻¹				
		λ (D)	W m ⁻¹ K ⁻¹	2.00		0.035
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	m ² s ⁻¹ 10 ⁻⁶				
		a (D)	m ² /s	7.9E-07		
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ _s	J m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹	2'256			
Wärmeindringzahl	b	kJ m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹	2.26			
		kJ m ⁻² h ^{-1/2} K ⁻¹	0.14			
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.147			
Albedo	α	–	0.38			
Emissivität	ε	–	0.95			
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	43.8			
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.50			
Wasseraufnahmekoeffizient	w	kg m ⁻² s ^{-0.5}	n.a.			
		kg m ⁻² h ^{-0.5}	1.80			
Abflussbeiwert	ψ	–	n.a.			
Lebensdauer	a	–	50			
Unterhalt			nein			
Nachrüstbarkeit			ja			
Stromproduktion			nein			
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–				
f _m 125		–	0.01			
f _m 250		–	0.01			
f _m 500		–	0.01			
f _m 1000		–	0.02			
f _m 2000		–	0.02			
f _m 4000		–	0.02			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	282	9'800		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	54'144	29'400		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.18	7.60		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	34	23		
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ _a	°C	22.9			
PET Tag	PET	°C	37.3			

		Literatur	
		Gesamt	Beton, hellgrau EPS
(m)	spez. KW	spez. KW	
0.200	3.00		Zürcher Zürcher
			Zürcher Zürcher
			Zürcher Zürcher
			Wilson
			Wilson
			Wilson
			Hentschel/ Witting
			Hauser
			BNB BNB
			Bobran
			Bobran
			Bobran
			Bobran
			Bobran
			Bobran
			KBOB KBOB
		83'544	
			KBOB KBOB
		57	

Literatur:

BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen 2017*, Berlin, 2017.

H. W. Bobran and I. Bobran-Wittfoht, *Handbuch der Bauphysik*, 8th ed. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co KG, 2010.

G. Hauser, *Bauphysikalische Grundlagen Feuchtelehre – Vorlesungsskript Bauphysik I und II*, Kassel, 2003.

H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung*, 5th ed. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2002.

KBOB / eco-bau / IPB. Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 (V6.2). Schweiz, 2022.

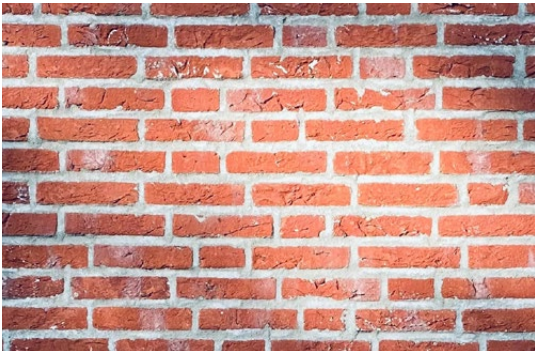
H. R. Wilson, J. Hanek, and T. Kuhn, *Solar Reflectance Index (SRI) of Concrete*, CPI, vol. 05, pp. 104–109, 2015.

W. Witting, *Licht. Sehen. Gestalten*, Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag, 2014.

C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

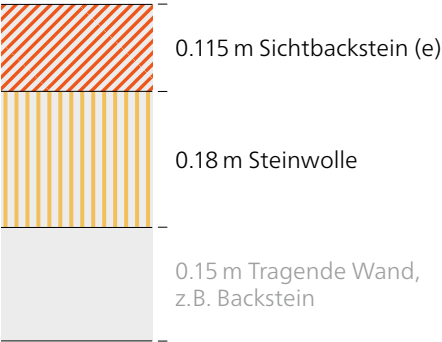
4.1.2 Zweischalenmauerwerk mit Kerndämmung, Sichtbackstein aussen
(ZW_Zweischalenmauerwerk_Kerndämmung)

Ansicht



Quelle: Maarten Scheer auf Unsplash

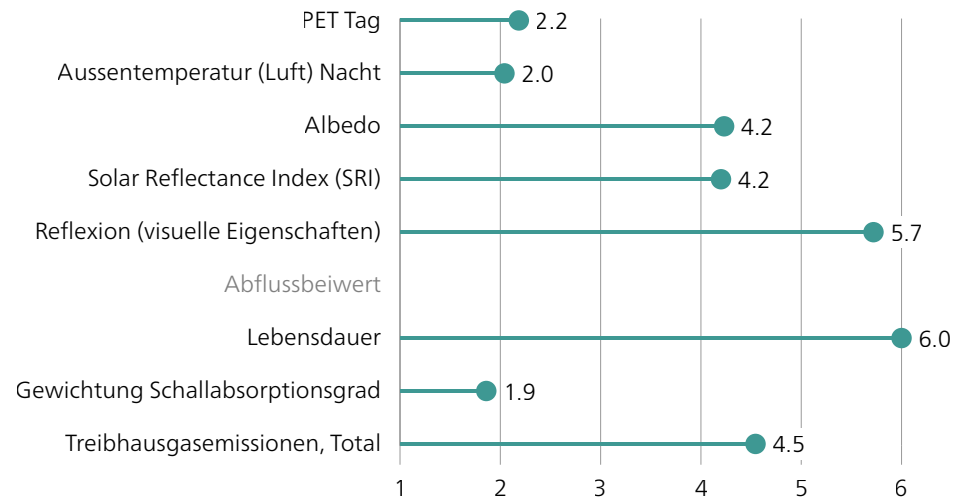
Aufbau



Materialdaten		Sichtbackstein
PET Tag	°C	38.6
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.8
Albedo	–	0.55
Solar Reflectance Index (SRI)	–	64
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.13
Abflussbeiwert	–	n.a.
Lebensdauer	a	50
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.21
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	60.6

Bewertung

Sichtbackstein



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Sichtbackstein		Steinwolle		
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)
Density (Rohdichte)	ρ	kg m ⁻³	1'800	0.115	207.00	38	0.18
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	0.90				
		J kg ⁻¹ K ⁻¹	900			870	
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	MJ m ⁻³ K ⁻¹	1.62				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	W m ⁻¹ K ⁻¹					
	λ (D)	W m ⁻¹ K ⁻¹	1.80			0.035	
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	m ² s ⁻¹ 10 ⁻⁶					
	a (D)	m ² /s	1.1E-06				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ _s	J m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹	1'708				
Wärmeindringzahl	b	kJ m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹	1.71				
		kJ m ⁻² h ^{-1/2} K ⁻¹	0.10				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.175				
Albedo	α	–	0.55				
Emissivität	ε	–	0.90				
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	64.0				
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.13				
Wasseraufnahmekoeffizient	w	kg m ⁻² s ^{-0.5}	n.a.				
		kg m ⁻² h ^{-0.5}	25.10				
Abflussbeiwert	ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	50				
Unterhalt			nein				
Nachrüstbarkeit			eventuell				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f _m 125		–	0.02				
f _m 250		–	0.03				
f _m 500		–	0.03				
f _m 1000		–	0.04				
f _m 2000		–	0.05				
f _m 4000		–	0.07				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	371			1'360	
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	76'797			9'302	
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.27			0.82	
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	55			6	
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ _a	°C	22.8				
PET Tag	PET	°C	38.6				

	Gesamt spez. KW	Literatur	
		Sichtbackstein	Steinwolle
spez. KW			
6.84		Zürcher	Zürcher
		Zürcher	Zürcher
		Zürcher	Zürcher
		Radhi	
		Radhi	
		Radhi	
		Hentschel	
		Schwarz	
		BNB	BNB
		Bobran	
		Bobran	
		Bobran	
		Bobran	
		Bobran	
		Bobran	
		KBOB	KBOB
	86'099		
		KBOB	KBOB
	61		

Literatur:

- BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen* 2017, Berlin, 2017.
- H. W. Bobran and I. Bobran-Wittfoht, *Handbuch der Bauphysik*, 8th ed. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co KG, 2010.
- H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung*, 5th ed. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2002.
- KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 (V6.2)*. Schweiz, 2022.
- S. Kotthaus, T. E. L. Smith, M. J. Wooster, and C. S. B. Grimmond, *Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy*, ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., vol. 94, pp. 194–212, 2014.
- H. Radhi, E. Assem, and S. Sharples, *On the colours and properties of building surface materials to mitigate urban heat islands in highly productive solar regions*, Build. Environ., vol. 72, pp. 162–172, 2014.
- B. Schwarz, *Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen*, Stuttgart, 1971.
- C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

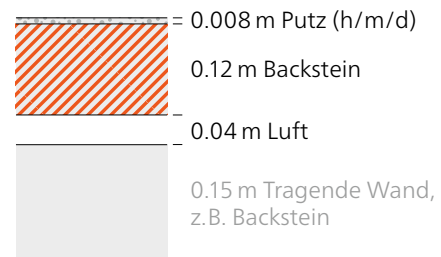
4.1.3 Zweischalenmauerwerk verputzt (ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschicht)

Ansicht

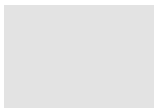


Quelle: www.oekologisch-bauen.info

Aufbau



Farbvarianten



hell



mittel

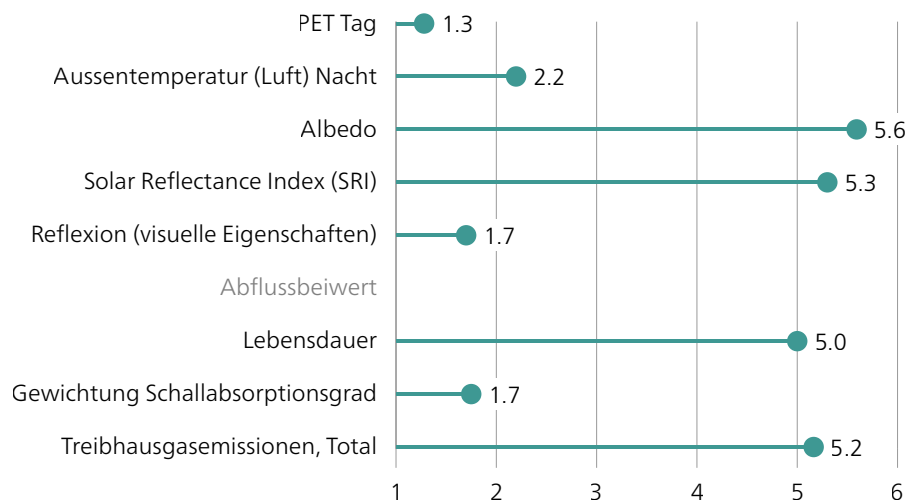


dunkel

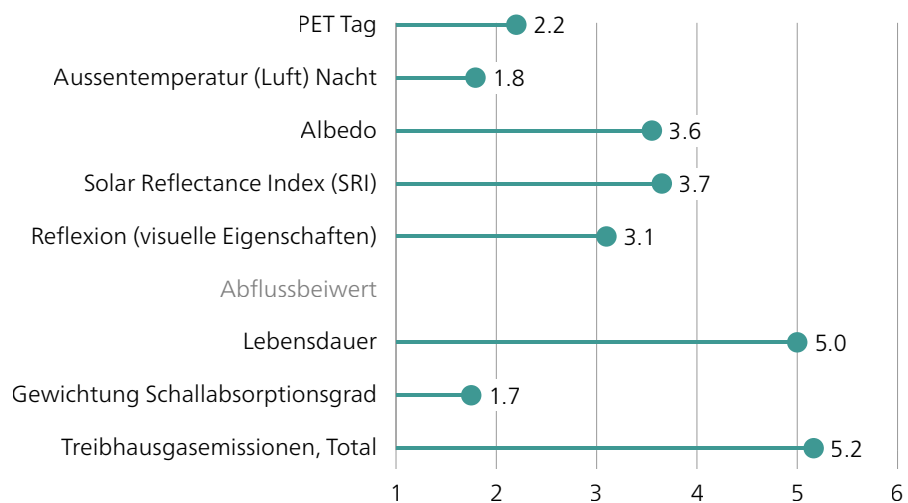
Materialdaten		Putz, hell	Putz, mittel	Putz, dunkel
PET Tag	°C	40.2	38.6	38.0
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.7	22.9	22.9
Albedo	–	0.75	0.45	0.26
Solar Reflectance Index (SRI)	–	86	53	35
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.70	0.50	0.25
Abflussbeiwert	–	n.a.	n.a.	n.a.
Lebensdauer	a	45	45	45
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.20	0.20	0.20
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	35.7	35.7	35.7

Bewertung

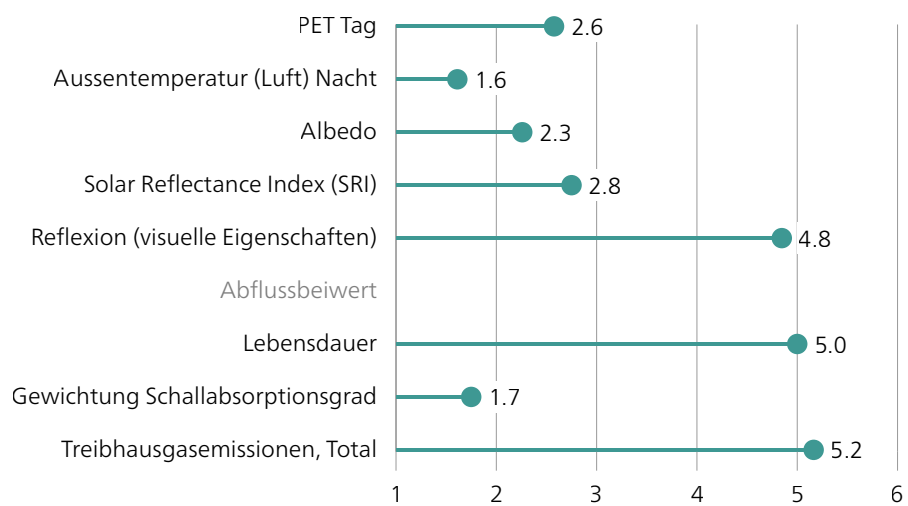
Putz, hell



Putz, mittel



Putz, dunkel



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Putz				
			hell	mittel	dunkel		
			Kennwert	Kennwert	Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'800			0.008	14.40
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.10				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'100				
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.98				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.87				
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
	a (D)	m^2/s	4.4E-07				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1312				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.31				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.08				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.110				
Albedo	α	–	0.75	0.45	0.26		
Emissivität	ε	–	0.85	0.90	0.95		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	86.0	53.0	35.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.70	0.50	0.25		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.				
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	2.50				
Abflussbeiwert	ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	45				
Unterhalt			nein				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	0.02				
f_m 250		–	0.02				
f_m 500		–	0.03				
f_m 1000		–	0.04				
f_m 2000		–	0.05				
f_m 4000		–	0.05				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	396				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	5'702				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.26				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	3.79				
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.7	22.9	22.9		
PET Tag	PET	°C	40.2	38.6	38.0		

Backstein			Gesamt	Literatur	
Kennwert	(m)	spez. KW	spez. KW	Putz	Backstein
1'000	0.12	120.00		Zürcher	zzwancor
900				Zürcher	zzwancor
0.30				Zürcher	zzwancor
				Alchapar	
				Alchapar	
				Alchapar	
				Hentschel	
				Hauser	
				BNB	BNB
				Bobran	
				Bobran	
				Bobran	
				Bobran	
				Bobran	
				Bobran	
371				KBOB	KBOB
44'520			50'222		
0.27				KBOB	KBOB
32			36		

Literatur:

- N. L. Alchapar, E. N. Correa, and A. M. Cantón, *Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones*, Energy Build., vol. 69, pp. 22–32, 2014.
- BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen 2017*, Berlin, 2017.
- H. W. Bobran and I. Bobran-Wittfoht, *Handbuch der Bauphysik*, 8th ed. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co KG, 2010.
- G. Hauser, *Bauphysikalische Grundlagen Feuchtelehre – Vorlesungsskript Bauphysik I und II*, Kassel, 2003.
- H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung*, 5th ed. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2002.
- KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 (V6.2)*. Schweiz, 2022.
- C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.
- zzwancor, *Mauerwerkshandbuch* [Online]. Available: <https://www.zz-aq.ch/produkte/wand/mauerwerk/swissmodul-10.html>

4.2 Verputzte Aussendämmung

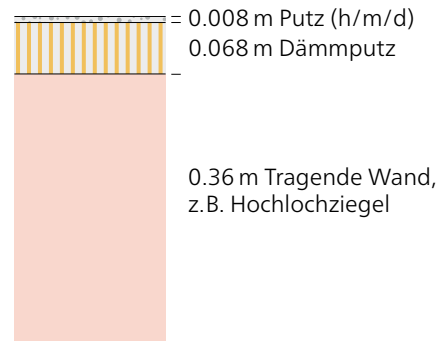
4.2.1 Einschalenbacksteinmauerwerk mit 7 cm Dämmputz (VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Dämmputz)

Ansicht

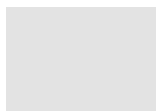


Quelle: www.oekologisch-bauen.info

Aufbau



Farbvarianten



hell



mittel



dunkel

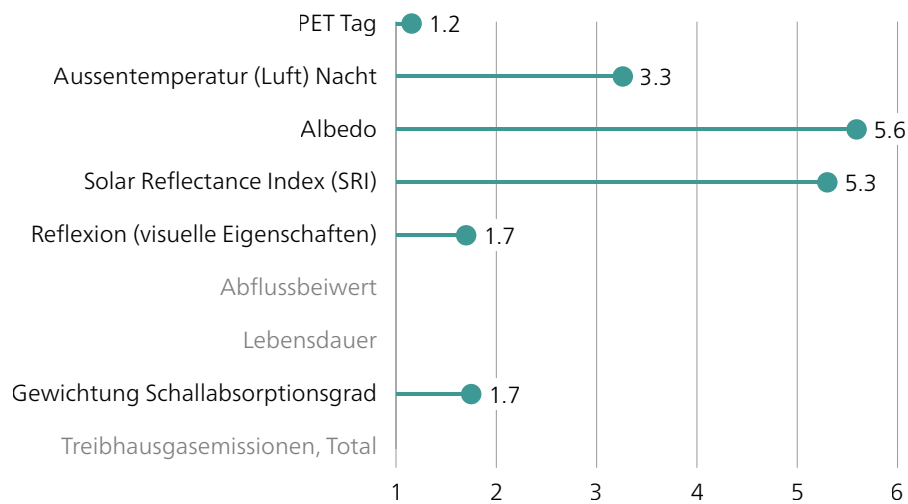
Materialdaten

		Putz, hell	Putz, mittel	Putz, dunkel
PET Tag	°C	40.4	38.9	38.3
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.3	22.4	22.4
Albedo	–	0.75	0.45	0.26
Solar Reflectance Index (SRI)	–	86	53	35
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.70	0.50	0.25
Abflussbeiwert	–	n.a.	n.a.	n.a.
Lebensdauer	a	n.a.	n.a.	n.a.
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.20	0.20	0.20
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT	#WERT	#WERT

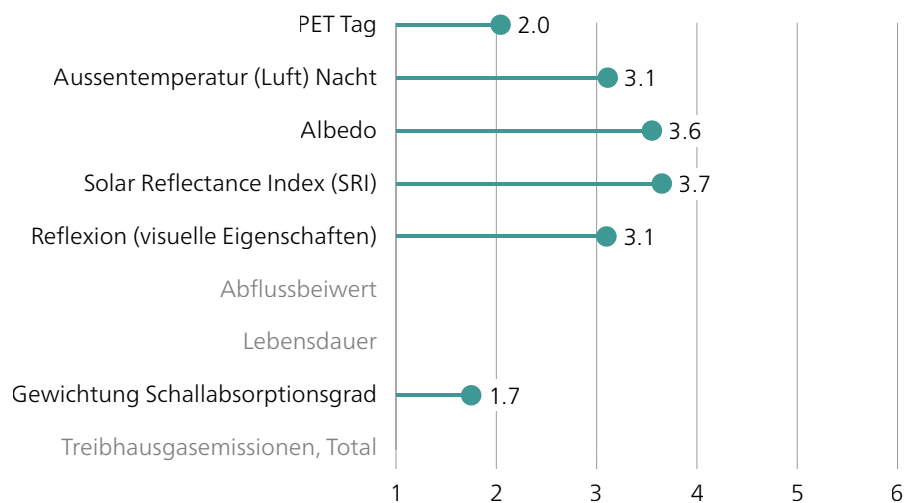
Kommentare: Die Angaben zur Lebensdauer beziehen sich auf den Deckputz. Für den Dämmputz selber existieren keine Angaben zur Lebensdauer. Es ist möglich, dass die Lebensdauer der Konstruktion kürzer ist. Die Angaben zum Schallabsorptionsgrad beziehen sich auf eine verputzte Mauerwerkswand. Für Wände mit einer dickeren Putzschicht existieren keine Angaben.

Bewertung

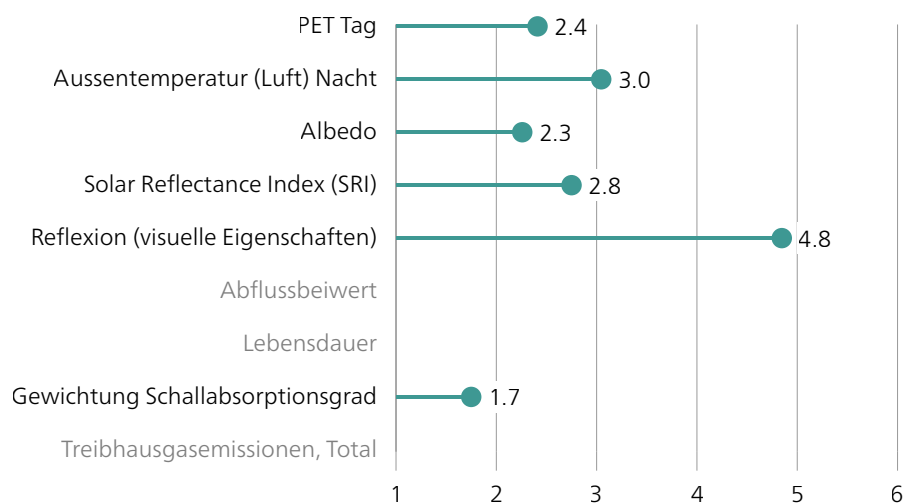
Putz, hell



Putz, mittel



Putz, dunkel



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Putz			(m)	spez. KW
			hell	mittel	dunkel		
			Kennwert	Kennwert	Kennwert		
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'500			0.006	9.00
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.90				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	900				
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.35				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.50				
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
	a (D)	m^2/s	3.7E-07				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	822				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.82				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.05				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.101				
Albedo	α	–	0.75	0.45	0.26		
Emissivität	ε	–	0.85	0.90	0.95		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	86.0	53.0	35.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.70	0.50	0.25		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.				
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	2.5				
Abflussbeiwert	ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	n.a.				
Unterhalt			nein				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	0.02				
f_m 250		–	0.02				
f_m 500		–	0.03				
f_m 1000		–	0.04				
f_m 2000		–	0.05				
f_m 4000		–	0.05				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	396				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	3'564				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.26				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	2				
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.3	22.4	22.4		
PET Tag	PET	°C	40.4	38.9	38.3		

						Literatur			
Dämmputz			Hochlochziegel			Gesamt	Putz aussen	Dämmputz	Hochlochziegel
Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)	spez. KW	spez. KW			
220	0.070	15.40	750	0.365	273.75		Hagatherm	Hagatherm	Schild
1.00									
1'000			1'000				Zürcher	WECOBIS	Schild
0.22									
0.054			0.33				Hagatherm	Hagatherm	Schild
2.5E-07									
109									
0.11									
0.01									
0.082									
							Alchapar		
							Alchapar		
							Alchapar		
							Hentschel		
1.37							Hauser	Hagatherm	
							BNB		
nein									
ja									
nein									
							Bobran		
							Bobran		
							Bobran		
							Bobran		
							Bobran		
							Bobran		
n.a.			371				KBOB		KBOB
#WERT!			101'561			#WERT!			
n.a.			0.27				KBOB		KBOB
#WERT!			73			#WERT!			

Literatur:

N. L. Alchapar, E. N. Correa, and A. M. Cantón, *Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones*, Energy Build., vol. 69, pp. 22–32, 2014.

H. W. Bobran and I. Bobran-Wittfoht, *Handbuch der Bauphysik*, 8th ed. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co KG, 2010.

BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen 2017*, Berlin, 2017.

Bundesministerium des Innern für Bau und Heimat, *WECOBIS*, 2018 [Online]. Available: www.wecobis.de [Accessed: 03-Feb-2020].

G. Hauser, *Bauphysikalische Grundlagen Feuchtelehre – Vorlesungsskript Bauphysik I und II*, Kassel, 2003.

KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009 / 1:2022 (V6.2)*. Schweiz, 2022.

K. Schild and W. M. Willems, *Wärmeschutz*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.

C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

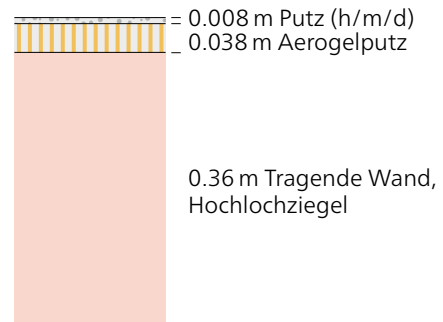
4.2.2 Einschalenbacksteinmauerwerk mit 4 cm Aerogeldämmputz (VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz)

Ansicht

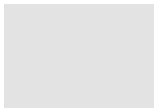


Quelle: www.oekologisch-bauen.info

Aufbau



Farbvarianten



hell



mittel



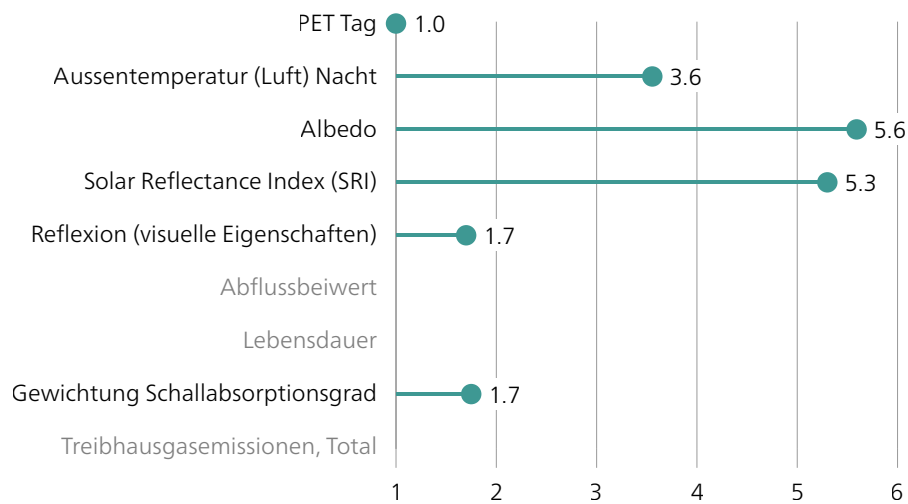
dunkel

Materialdaten		Putz, hell	Putz, mittel	Putz, dunkel
PET Tag	°C	40.6	39.2	38.6
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.2	22.3	22.3
Albedo	–	0.75	0.45	0.26
Solar Reflectance Index (SRI)	–	86	53	35
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.70	0.50	0.25
Abflussbeiwert	–	n.a.	n.a.	n.a.
Lebensdauer	a	n.a.	n.a.	n.a.
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.20	0.20	0.20
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	WERT!	#WERT!	#WERT!

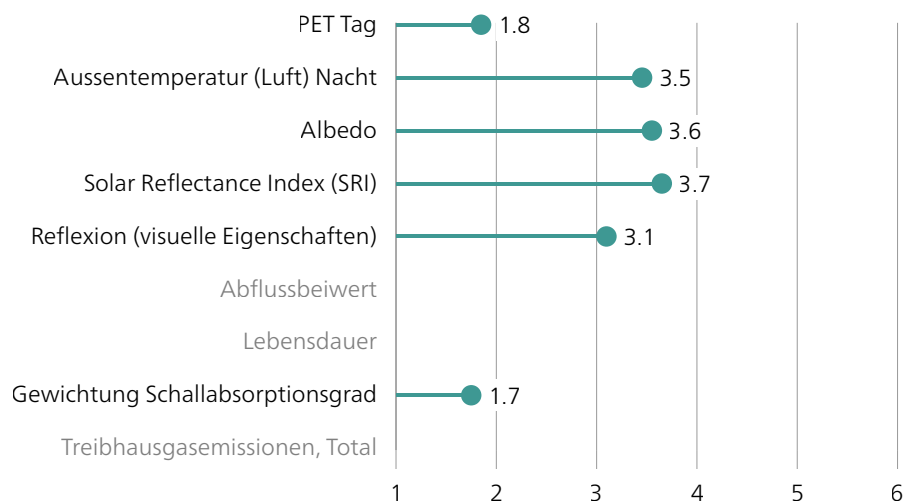
Kommentare: Die Angaben zur Lebensdauer beziehen sich auf den Deckputz. Für den Aerogelputz selber existieren keine Angaben zur Lebensdauer. Es ist möglich, dass die Lebensdauer der Konstruktion kürzer ist. Die Angaben zum Schallabsorptionsgrad beziehen sich auf eine verputzte Mauerwerkswand. Für Wände mit einer dickeren Putzschicht existieren keine Angaben.

Bewertung

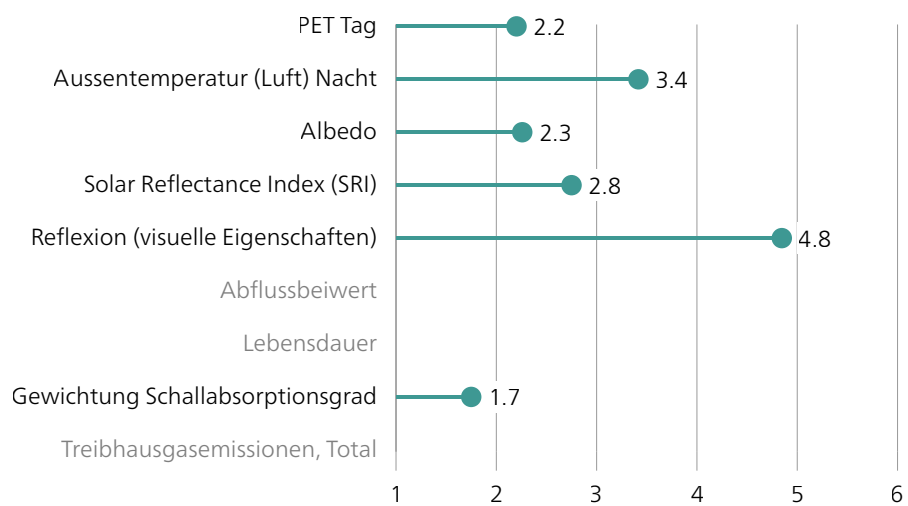
Putz, hell



Putz, mittel



Putz, dunkel



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Putz				
			hell	mittel	dunkel	(m)	spez. KW
			Kennwert	Kennwert	Kennwert		
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'500			0.006	9.00
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.90				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	900				
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.35				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.50				
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
	a (D)	m^2/s	3.7E-07				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	822				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.82				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.05				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.101				
Albedo	α	–	0.75	0.45	0.26		
Emissivität	ϵ	–	0.85	0.90	0.95		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	86.0	53.0	35.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.70	0.50	0.25		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.				
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	2.5				
Abflussbeiwert	Ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	n.a.				
Unterhalt			nein				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	0.02				
f_m 250		–	0.02				
f_m 500		–	0.03				
f_m 1000		–	0.04				
f_m 2000		–	0.05				
f_m 4000		–	0.05				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	396				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	3'564				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.26				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	2				
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.2	22.3	22.3		
PET Tag	PET	°C	40.6	39.2	38.6		

Aerogelputz			Hochlochziegel			Gesamt	Literatur		
hell							Putz aussen	Aerogelputz hell	Hochlochziegel
Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)	spez. KW				
220	0.04	8.80	750	0.365	273.75		Hagatherm	Fixit 222	Schild
1.25									
1'250			1'000				Zürcher	www.energie-experten.org	Schild
0.28									
0.028			0.33				Hagatherm	Fixit	Schild
1.0E-07									
88									
0.09									
0.01									
0.053									
							Alchapar		
							Alchapar		
							Alchapar		
							Hentschel		
n.a.									
n.a.							Hauser		
							BNB		
nein									
ja									
nein									
							Bobran		
							Bobran		
							Bobran		
							Bobran		
							Bobran		
							Bobran		
n.a.			371				KBOB		KBOB
#WERT!			101'561			#WERT!			
n.a.			0.27				KBOB		KBOB
#WERT!			73			#WERT!			

Literatur:

N. L. Alchapar, E. N. Correa, and A. M. Cantón, *Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones*, Energy Build., vol. 69, pp. 22–32, 2014.

BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen 2017*, Berlin, 2017.

H. W. Bobran and I. Bobran-Wittfoht, *Handbuch der Bauphysik*, 8th ed. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co KG, 2010.

G. Hauser, *Bauphysikalische Grundlagen Feuchtelehre – Vorlesungsskript Bauphysik I und II*, Kassel, 2003.

KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009 / 1:2022 (V6.2)*. Schweiz, 2022.

K. Schild and W. M. Willems, *Wärmeschutz*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.

C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

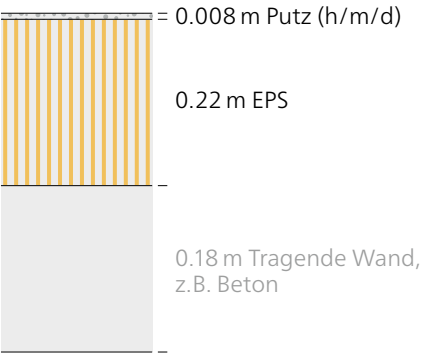
4.2.3 Kompaktfassade (EPS) (VA_Kompaktfassade_EPS)

Ansicht



Quelle: www.oekologisch-bauen.info

Aufbau



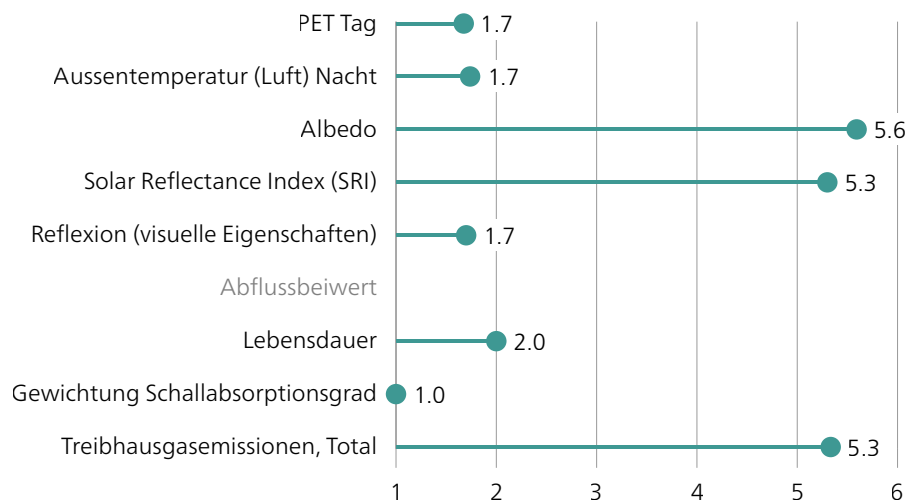
Farbvarianten



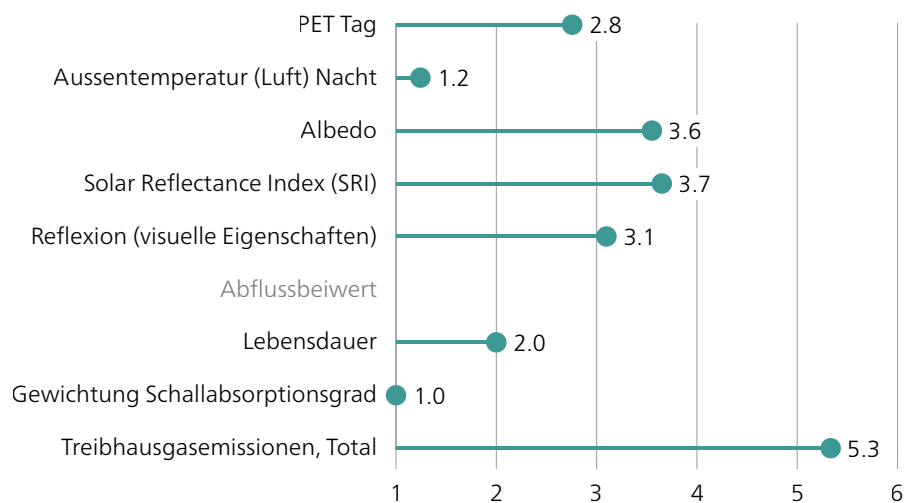
Materialdaten		Putz, hell	Putz, mittel	Putz, dunkel
PET Tag	°C	39.5	37.7	36.9
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.9	23.1	23.1
Albedo	–	0.75	0.45	0.26
Solar Reflectance Index (SRI)	–	86	53	35
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.70	0.50	0.25
Abflussbeiwert	–	n.a.	n.a.	n.a.
Lebensdauer	a	30	30	30
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.09	0.09	0.09
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	28.9	28.9	28.9

Bewertung

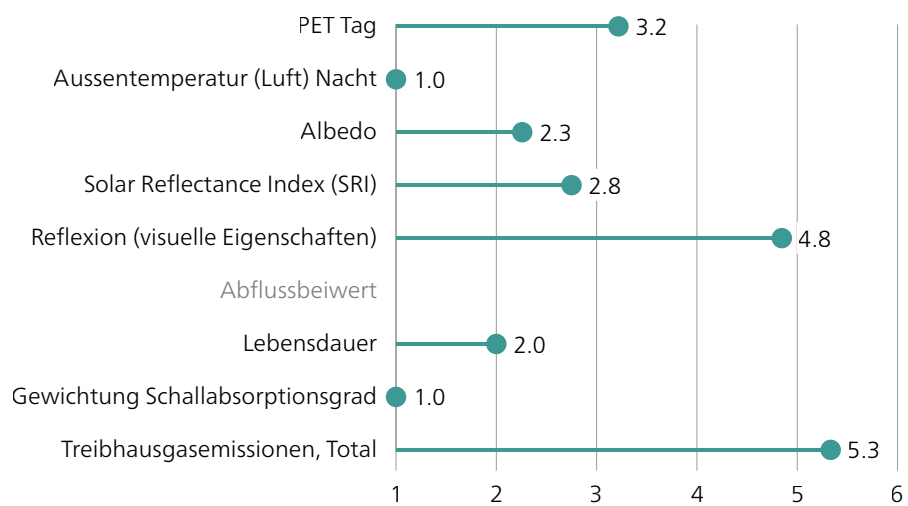
Putz, hell



Putz, mittel



Putz, dunkel



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Putz				
			hell	mittel	dunkel		
			Kennwert	Kennwert	Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'800			0.008	14.40
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.10				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'100				
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.98				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.87				
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
	a (D)	m^2/s	4.4E-07				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'312				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.31				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.08				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.110				
Albedo	α	–	0.75	0.45	0.26		
Emissivität	ϵ	–	0.85	0.90	0.95		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	86.0	53.0	35.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.70	0.50	0.25		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.				
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	2.50				
Abflussbeiwert	Ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	30				
Unterhalt			nein				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	0.02				
f_m 250		–	0.05				
f_m 500		–	0.03				
f_m 1000		–	0.00				
f_m 2000		–	0.00				
f_m 4000		–	0.00				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	396				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	5'702				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.26				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	4				
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.9	23.1	23.1		
PET Tag	PET	°C	39.5	37.7	36.9		

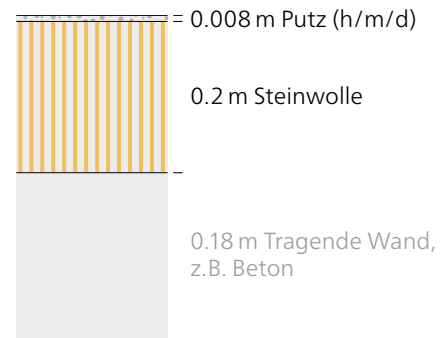
4.2.4 Kompaktfassade (Steinwolle) (VA_Kompaktfassade_Steinwolle)

Ansicht

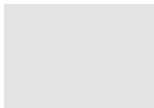


Quelle: www.oekologisch-bauen.info

Aufbau



Farbvarianten



hell



mittel

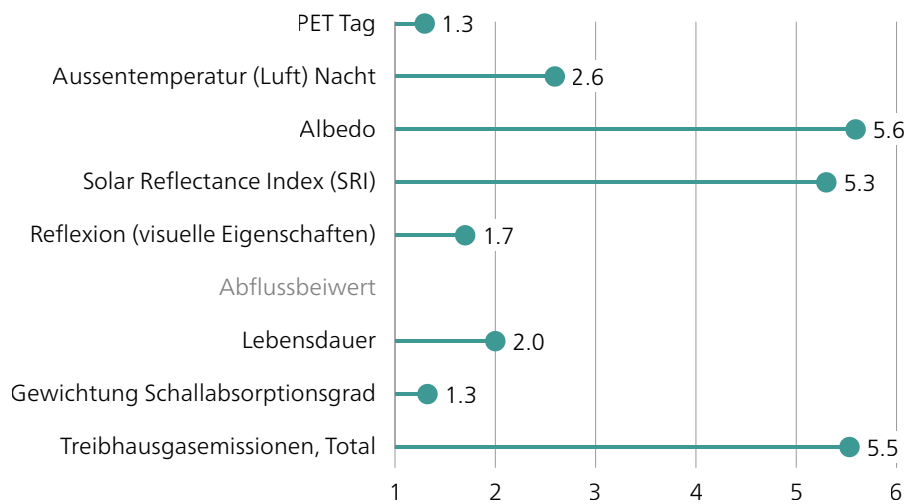


dunkel

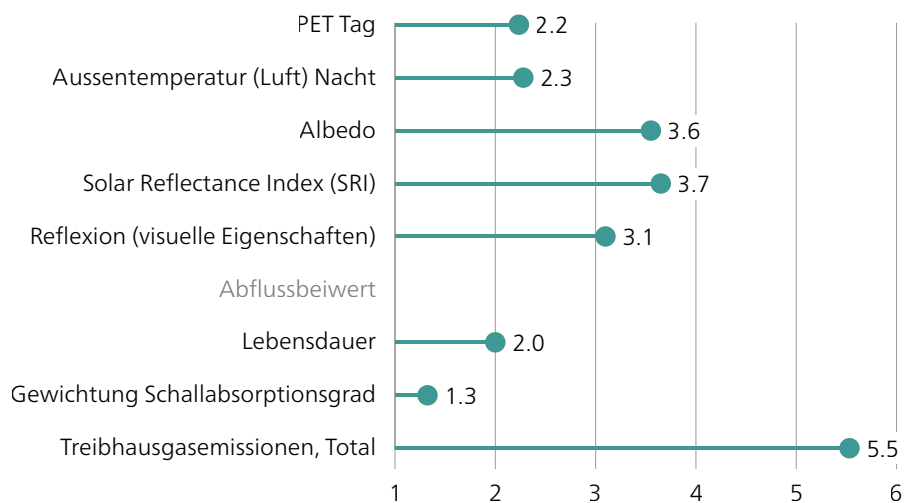
Materialdaten		Putz, hell	Putz, mittel	Putz, dunkel
PET Tag	°C	40.1	38.6	37.9
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.6	22.7	22.7
Albedo	–	0.75	0.45	0.26
Solar Reflectance Index (SRI)	–	86	53	35
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.70	0.50	0.25
Abflussbeiwert	–	n.a.	n.a.	n.a.
Lebensdauer	a	30	30	30
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.14	0.14	0.14
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	20.9	20.9	20.9

Bewertung

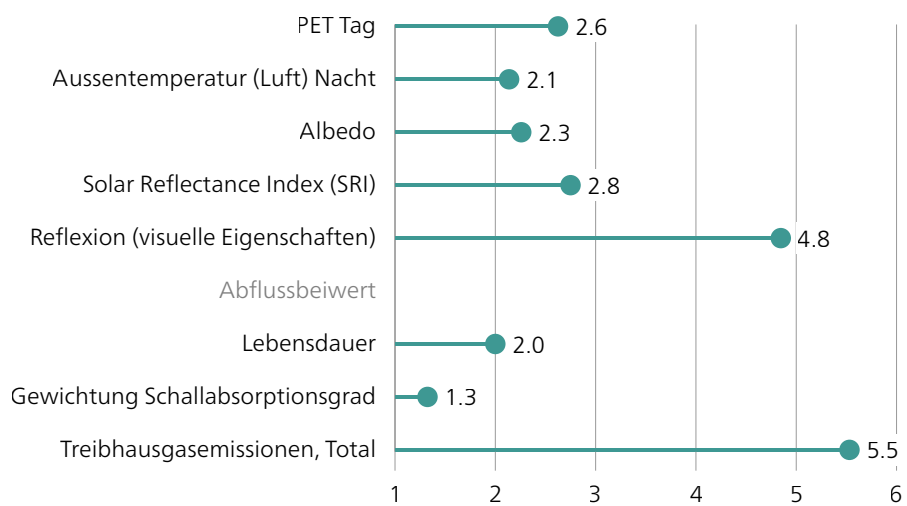
Putz, hell



Putz, mittel



Putz, dunkel



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Putz				
			hell	mittel	dunkel		
			Kennwert	Kennwert	Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'800			0.008	14.40
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.10				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'100				
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.98				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.87				
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
	a (D)	m^2/s	4.4E-07				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'312				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.31				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.08				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.110				
Albedo	α	–	0.75	0.45	0.26		
Emissivität	ε	–	0.85	0.90	0.95		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	86.0	53.0	35.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.70	0.50	0.25		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.				
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	2.50				
Abflussbeiwert	ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	30				
Unterhalt			nein				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	0.01				
f_m 250		–	0.19				
f_m 500		–	0.02				
f_m 1000		–	0.01				
f_m 2000		–	0.01				
f_m 4000		–	0.00				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	396				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	5'702				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.26				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	4				
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.6	22.7	22.7		
PET Tag	PET	°C	40.1	38.6	37.9		

Steinwolle			Gesamt	Literatur	
Kennwert	(m)	spez. KW	spez. KW	Putz aussen	Steinwolle
105	0.20	21.00		Zürcher	Swisspor ROC
1'044				Zürcher	Swisspor ROC
0.034				Zürcher	Swisspor ROC
				Alchapar	
				Alchapar	
				Alchapar	
				Hentschel	
				Hauser	
				BNB	BNB
				Kirchsteiger	
				Kirchsteiger	
				Kirchsteiger	
				Kirchsteiger	
				Kirchsteiger	
				Kirchsteiger	
1'360				KBOB	
28'560			34'262		
0.82				KBOB	
17			21		

Literatur:

N. L. Alchapar, E. N. Correa, and A. M. Cantón, *Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones*, *Energy Build.*, vol. 69, pp. 22–32, 2014.

BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen* 2017, Berlin, 2017.

G. Hauser, *Bauphysikalische Grundlagen Feuchtelehre – Vorlesungsskript Bauphysik I und II*, Kassel, 2003.

KBOB / eco-bau / IPB, Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 (V6.2). Schweiz, 2022.

S. K. Kirchsteiger, *Masterarbeit Schallabsorptionspotential urbaner Fassadensysteme*, Graz, 2017.

C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

4.3 Glassfassade / Leichtbau

4.3.1 Glasfassade (g-Wert 0.3) (LB_Glasfassade)

Ansicht



Quelle: www.rinoweder.ch

Aufbau

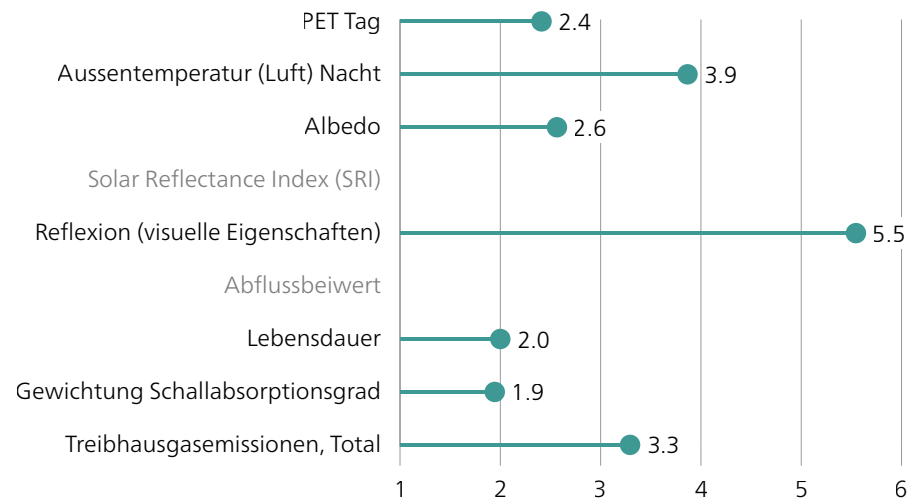
- 0.042 m Dreifach-Verglasung
- (3×0.006 m) mit Argon
- (2×0.012 m)

Materialdaten

		Glas
PET Tag	°C	38.3
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.1
Albedo	–	0.31
Solar Reflectance Index (SRI)	–	n.a.
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.2
Abflussbeiwert	–	n.a.
Lebensdauer	a	30.0
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.2
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	111.0

Bewertung

Glas



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			
			Glas			Argon
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert (m)
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'500	0.006	15.00	1.70 0.012
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.00			
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'000			519
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.50			
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$				
		λ (D)	1.00			0.017
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$				
		a (D)	4.0E-07			
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'581			
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.58			
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.09			
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.105			
Albedo	α	–	0.305			
Emissivität	ϵ	–	0.83			
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	n.a.			
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.15			
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	0.00			
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	0.00			
Abflussbeiwert	Ψ	–	n.a.			
Lebensdauer	a	–	30			
Unterhalt			nein			
Nachrüstbarkeit			nein			
Stromproduktion			nein			
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–				
f_m 125		–	0.12			
f_m 250		–	0.08			
f_m 500		–	0.05			
f_m 1000		–	0.04			
f_m 2000		–	0.03			
f_m 4000		–	0.02			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	185'000			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	185'000			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	111			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	111			
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.1			
PET Tag	PET	°C	38.3			

4.3.2 Glasfassade mit Rafflamellenstore (geschlossen) (LB_Glasfassade_Sonnenschutz)

Ansicht

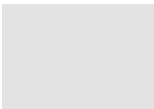


Quelle: Wolf Storen AG

Aufbau

-  - 0.00044 m Sonnenschutz (Aluminium, h/d)
-  0.1 m Hinterlüftung
-  - 0.042 m Dreifach-Verglasung (3×0.006 m)
- - mit Argon (2×0.012 m)

Farbvarianten



hell

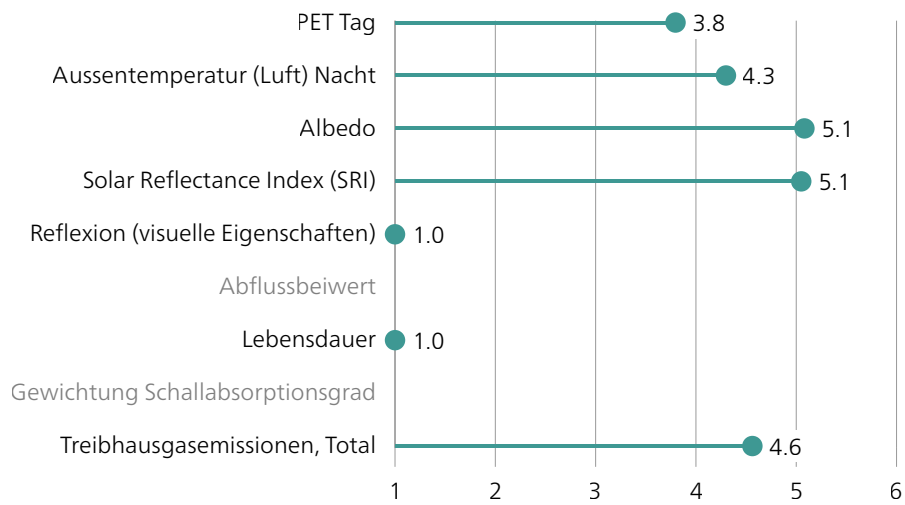


dunkel

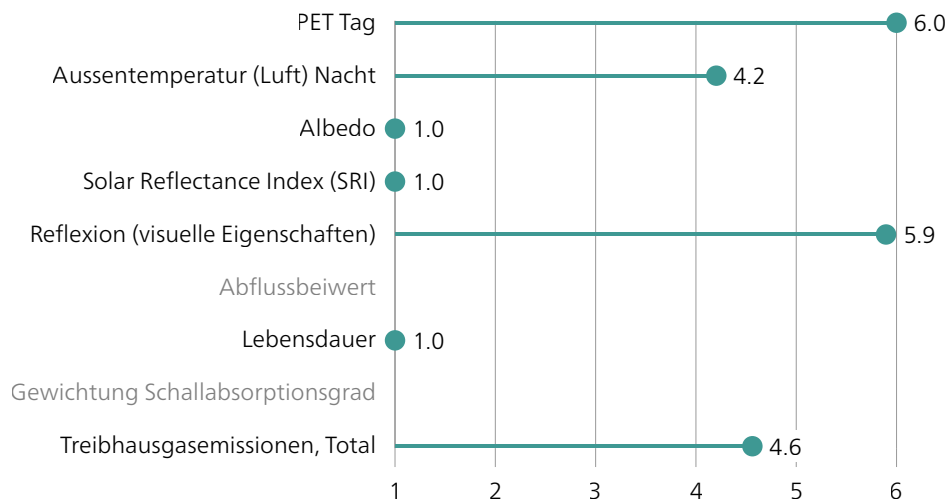
Materialdaten		Sonnenschutz hell	S. dunkelgrau
PET Tag	°C	36.0	32.3
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.0	22.0
Albedo	–	0.68	0.08
Solar Reflectance Index (SRI)	–	81	0
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.80	0.10
Abflussbeiwert	–	n.a.	n.a.
Lebensdauer	a	25	25
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	59.9	59.9

Bewertung

Rafflamellen, hell



Rafflamellen, dunkelgrau



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			
			Rafflamellen			
			hell	dunkelgrau		
			Kennwert	Kennwert	(m)	spez. KW.
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'700		0.0004	1.19
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.88			
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	880			
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.38			
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$				
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	160			
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$				
	a (D)	m^2/s	6.7E-05			
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	19'498			
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	19.50			
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.17			
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	1.361			
Albedo	α	–	0.675	0.075		
Emissivität	ε	–	0.85	0.85		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	81.0	0.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.80	0.10		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	0.00			
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	0.00			
Abflussbeiwert	ψ	–	n.a.			
Lebensdauer	a	–	25			
Unterhalt			ja			
Nachrüstbarkeit			ja			
Stromproduktion			nein			
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–				
f_m 125		–	n.a.			
f_m 250		–	n.a.			
f_m 500		–	n.a.			
f_m 1000		–	n.a.			
f_m 2000		–	n.a.			
f_m 4000		–	n.a.			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	133'000			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	133'000			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	59.9			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	59.9			
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.0	22.0		
PET Tag	PET	°C	36.0	32.3		

	Literatur
Gesamt	Rafflamellen
spez. KW	
	Zürcher
	Zürcher
	Zürcher
	Santamouris
	Santamouris
	Santamouris
	Hentschel
	Annahme
	BNB
133'000	KBOB
133'000	
60	KBOB
60	

Literatur:

BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen 2017*, Berlin, 2017.

H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung*, 5th ed. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2002.

KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009 / 1:2022 (V6.2)*. Schweiz, 2022.

M. Santamouris, A. Synnefa, and T. Karlessi, *Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions*, Sol. Energy, vol. 85, pp.3085–3102, 2011.

C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

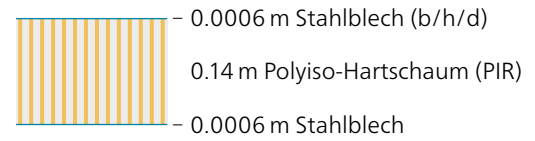
4.3.3 Sandwichpaneele (Leichtbaufassade Gewerbe-, Industriebau) (LB_Sandwichpaneel)

Ansicht



Quelle: www.ais-online.de

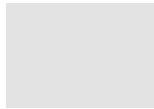
Aufbau



Farbvarianten



Metall



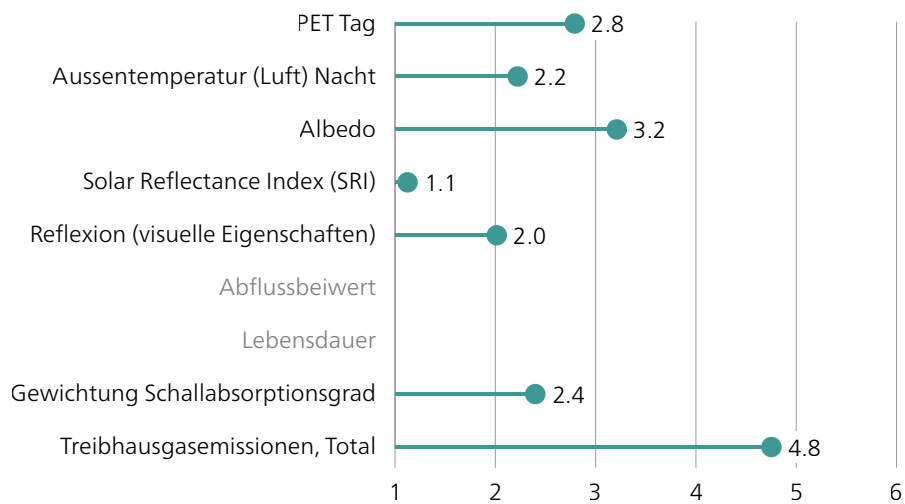
hell



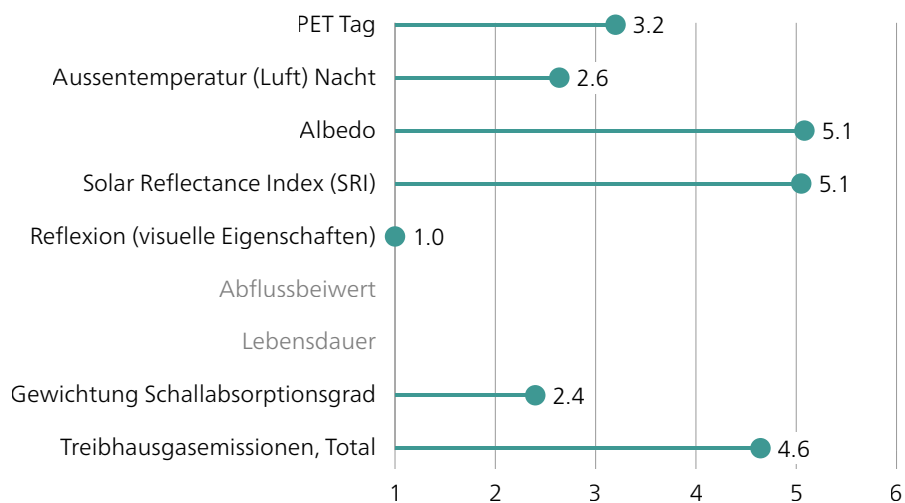
dunkel

Materialdaten		Stahlblech	S. hell	S. dunkelgrau
PET Tag	°C	37.6	37.0	33.5
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.7	22.6	22.8
Albedo	–	0.40	0.68	0.08
Solar Reflectance Index (SRI)	–	3	81	0
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.66	0.80	0.10
Abflussbeiwert	–	n.a.	n.a.	n.a.
Lebensdauer	a	n.a.	n.a.	n.a.
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.29	0.29	0.29
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	52.3	56.6	56.6

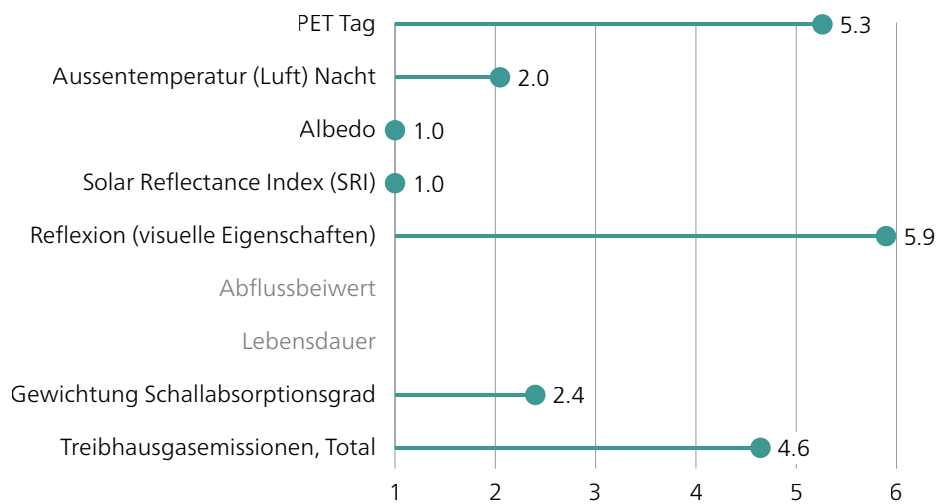
Bewertung Stahlblech



Stahlblech, hell



Stahlblech, dunkelgrau



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Stahlblech				
			Metall	hell	dunkelgrau		
			Kennwert	Kennwert	Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	7'800			0.0006	4.68
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.45				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	450				
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	3.51				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	50				
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
	a (D)	m^2/s	1.4E-05				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	13'248				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	13.25				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.79				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.626				
Albedo	α	–	0.400	0.675	0.075		
Emissivität	ε	–	0.35	0.850	0.850		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	2.5	81.0	0.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.66	0.800	0.100		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	0.00				
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	0.00				
Abflussbeiwert	ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	n.a.				
Unterhalt			nein				
Nachrüstbarkeit			nein				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	0.06				
f_m 250		–	0.06				
f_m 500		–	0.07				
f_m 1000		–	0.02				
f_m 2000		–	0.09				
f_m 4000		–	0.12				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	15'200	6'760	6'760		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	71'136	77'896	77'896		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	4.49	4.38	4.38		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	21	25	25		
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.7	22.6	22.8		
PET Tag	PET	°C	37.6	37.0	33.5		

4.4 Hinterlüftete Fassade

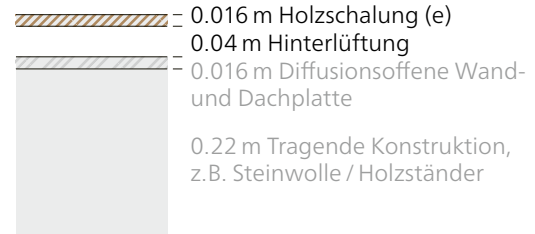
4.4.1 Holzverkleidung vor Holzständerwand mit Aussenwärmedämmung (HF_Holzverkleidung)

Ansicht



Quelle: www.holzbau-teubner.de

Aufbau



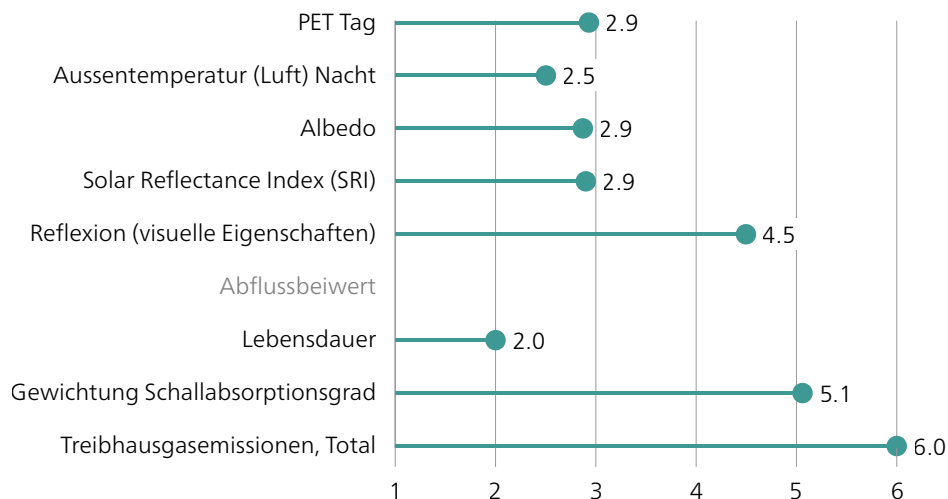
Materialdaten

Holzverkleidung Eiche

PET Tag	°C	37.4
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.6
Albedo	–	0.35
Solar Reflectance Index (SRI)	–	38
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.30
Abflussbeiwert	–	n.a.
Lebensdauer	a	30
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.66
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	2.0

Bewertung

Holzverkleidung Eiche



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			Gesamt	Literatur
			Holzverkleidung Eiche				
			Kennwert	(m)	spez. KW	spez. KW	Holzverkleidung Eiche
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	737	0.016	11.79		Niemz
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.61				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'610				Zürcher
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.19				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB) λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
		$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.17				Niemz
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB) a (D)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
		m^2/s	1.4E-07				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	444				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.44				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.03				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.062				
Albedo	α	–	0.35				techno-bloc.com
Emissivität	ϵ	–	0.90				Oke
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	38.0				techno-bloc.com
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.30				Hentschel
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	0.08				Ruisinger
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.				
Abflussbeiwert	Ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	30				BNB
Unterhalt			ja				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	0.19				Bobran
f_m 250		–	0.36				Bobran
f_m 500		–	0.73				Bobran
f_m 1000		–	0.50				Bobran
f_m 2000		–	0.25				Bobran
f_m 4000		–	0.31				Bobran
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	436				KBOB
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	5'141			5'141	
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.17				KBOB
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	2			2.04	
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.6				
PET Tag	PET	°C	37.4				

Literatur:

BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen* 2017, Berlin, 2017.

H. W. Bobran and I. Bobran-Wittfoht, *Handbuch der Bauphysik*, 8th ed. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co KG, 2010.

KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 (V6.2)*. Schweiz, 2022.

P. Niemz, *Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit ausgewählter einheimischer und fremdländischer Holzarten*, Bauphysik, vol. 29, no. 4, pp.311–312, 2007.

U. Ruisinger, E. Stöcker, J. Grunewald, and H. Stopp, *Holzbalkenaufgabe in historischem Mauerwerk: Analyse, Bewertung und energetische Sanierung mittels Innendämmung*, in Mauerwerk Kalender, W. Jäger, Ed. Erst & Sohn GmbH & Co. KG, 2016, pp.351–384.

T. R. Oke, M. Gerald, A. Christen, and J. A. Voogt, *Urban Climates*, 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

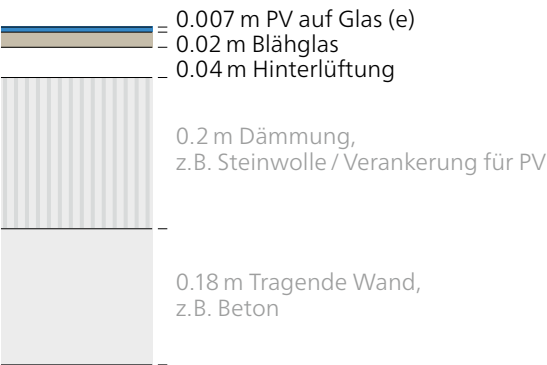
4.4.2 PV (hinterlüftet, Dämmung Steinwolle) (HF_Photovoltaik)

Ansicht



Quelle: www.ernstschweizer.ch

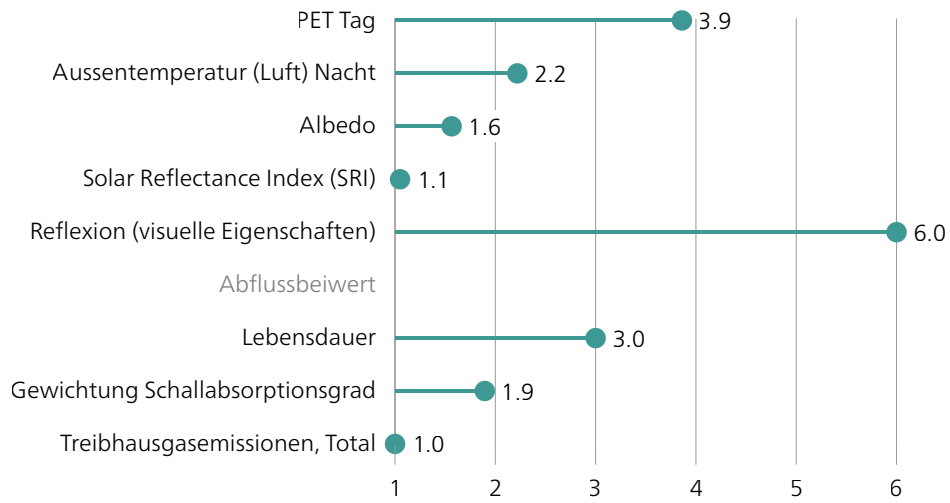
Aufbau



Materialdaten		PV/Glas
PET Tag	°C	35.8
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.7
Albedo	–	0.16
Solar Reflectance Index (SRI)	–	1
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.09
Abflussbeiwert	–	n.a.
Lebensdauer	a	35
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.22
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	203.3

Bewertung

PV / Glas



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			Blähglas	
			PV/Glas				
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'500	0.007	17.50	500	0.02
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.00				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'000			1'000	
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.50				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
		λ (D)	1.00			0.09	
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
		a (D)	4.0E-07				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'581				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.58				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.09				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.105				
Albedo	α	–	0.16				
Emissivität	ϵ	–	0.83				
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	1.0				
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.09				
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	0.00				
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	0.00				
Abflussbeiwert	Ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	35				
Unterhalt			ja				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			ja				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	0.18				
f_m 250		–	0.06				
f_m 500		–	0.04				
f_m 1000		–	0.03				
f_m 2000		–	0.02				
f_m 4000		–	0.02				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	2'890'000				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	481'667				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	1'220				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	203				
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.7				
PET Tag	PET	°C	35.8				

		Literatur	
	Gesamt	PV/Glas	Blähglas
spez. KW	spez. KW		
10.00		Zürcher	Wikipedia
		Zürcher	Wikipedia
		Zürcher	Wikipedia
		Cekon	
		Huizenga	
		Cekon	
		Cekon	
		www.swissolar.ch	
		PTB	
		PTB	
		PTB	
		PTB	
		PTB	
		PTB	
		KBOB	
	481'667		
		KBOB	
	203		

Literatur:

M. Cekon and P. Rovnanik, *Optical performance of colored crystalline solar cells for building energy efficient application*, in 2nd International Materials, Industrial, and Manufacturing Engineering Conference, MIMEC2015, 2015, pp. 342–

C. Huizenga, D. Arasteh, C. Curija, and J. Klema, *Berkeley Lab WINDOW*, Regents of the University of California, Berkeley, 2018.

KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022* (V6.2). Schweiz, 2022.

PTB, *Absorptionstabelle abstab_wf.xls*, 2020 [Online]. Available: www.ptb.de [Accessed: 08-Sep-2020].

C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

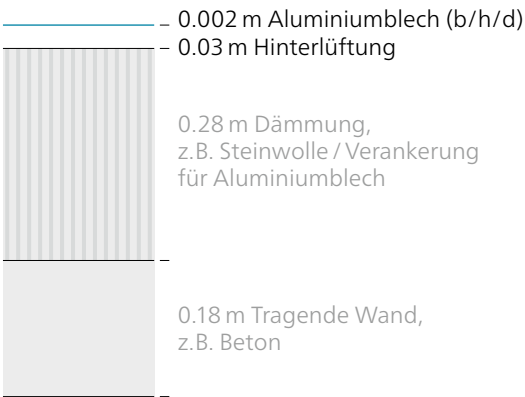
4.4.3 Metallblechverkleidung (HF_Metallblechverkleidung)

Ansicht



Quelle: www.gabs.ch

Aufbau



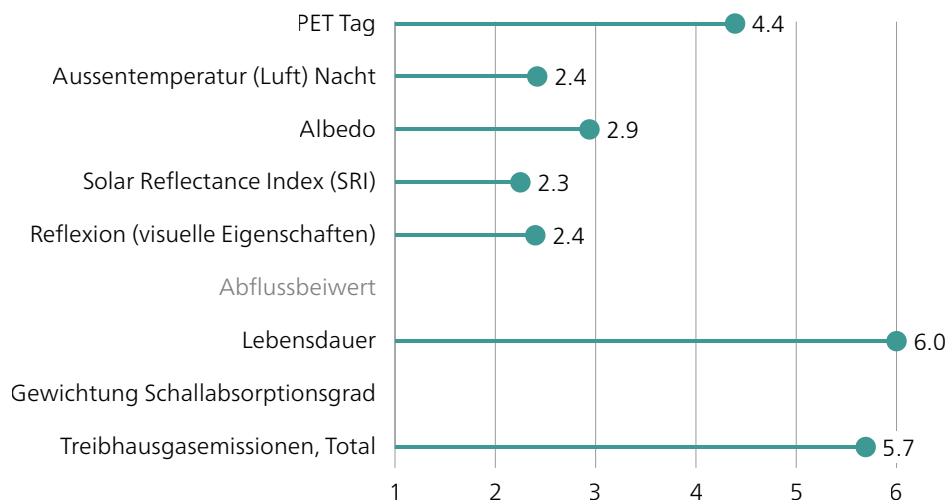
Farbvarianten



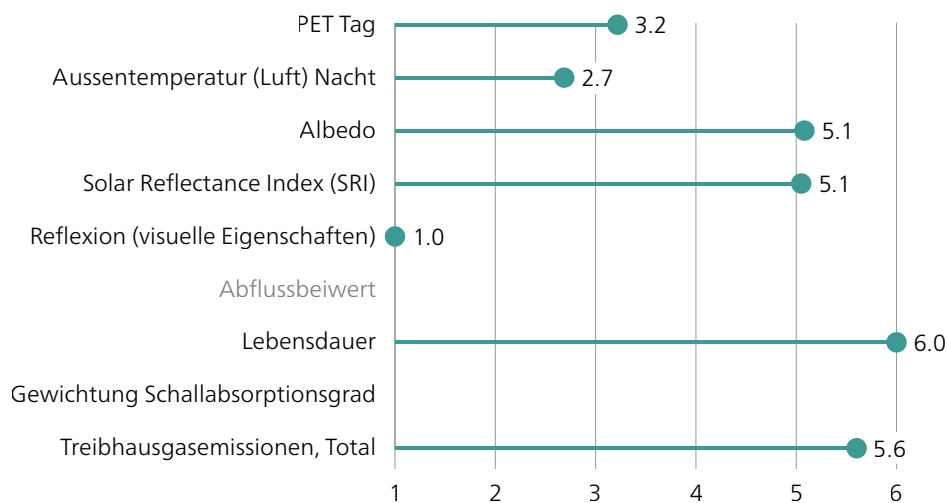
Materialdaten		Alublech	A. hell	A. dunkelgrau
PET Tag	°C	35.0	36.9	33.5
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.6	22.5	22.8
Albedo	–	0.36	0.68	0.08
Solar Reflectance Index (SRI)	–	25	81	0
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.60	0.80	0.10
Abflussbeiwert	–	n.a.	n.a.	n.a.
Lebensdauer	a	50	50	50
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.	n.a.	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	14.4	18.1	18.1

Bewertung

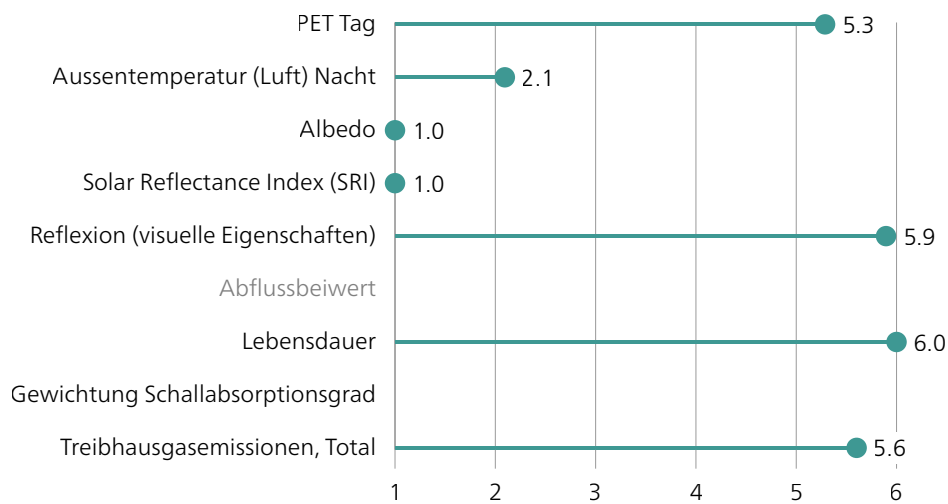
Alublech



Alublech, hell



Alublech, dunkelgrau



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Alublech				
			hell		dunkelgrau		
			Kennwert	Kennwert	Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'700			0.002	5.40
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.88				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	880				
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.38				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	160				
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
	a (D)	m^2/s	6.7E-05				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	19'498				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	19.50				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.17				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	1.361				
Albedo	α	–	0.36	0.68	0.075		
Emissivität	ε	–	0.58	0.85	0.85		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	25.0	81.0	0.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.60	0.80	0.10		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	0.00				
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	0.00				
Abflussbeiwert	ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	50				
Unterhalt			nein				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	n.a.				
f_m 250		–	n.a.				
f_m 500		–	n.a.				
f_m 1000		–	n.a.				
f_m 2000		–	n.a.				
f_m 4000		–	n.a.				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	12'700	6'260	6'260		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	68'580	74'840	74'840		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	2.67	3.64	3.64		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	14	18	18		
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.6	22.5	22.8		
PET Tag	PET	°C	35.0	36.9	33.5		

Gesamt		Literatur
		Alublech
A. blank	A. besch.	
		Zürcher
		Zürcher
		Zürcher
		Kotthaus
		Radhi
		SRI calculator
		Hentschel, Witting
		BNB
		KBOB
68'580	74'840	KBOB
14	18	

Literatur:

BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen 2017*, Berlin, 2017.

KBOB / eco-bau / IPB, Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 (V6.2). Schweiz, 2022.

S. Kotthaus, T. E. L. Smith, M. J. Wooster, and C. S. B. Grimmond, *Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy*, ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., vol. 94, pp. 194–212, 2014.

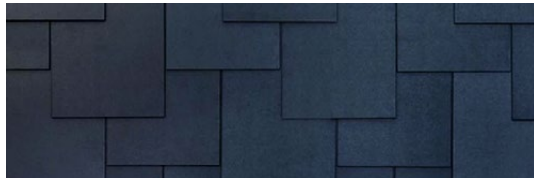
H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung*, 5th ed. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2002.

W. Witting, *Licht. Sehen. Gestalten*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag, 2014.

C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

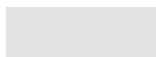
4.4.4 Faserzementverkleidung, Eternit (HF_Faserzementverkleidung)

Ansicht



Quelle: www.eternit.ch

Farbvarianten



hell

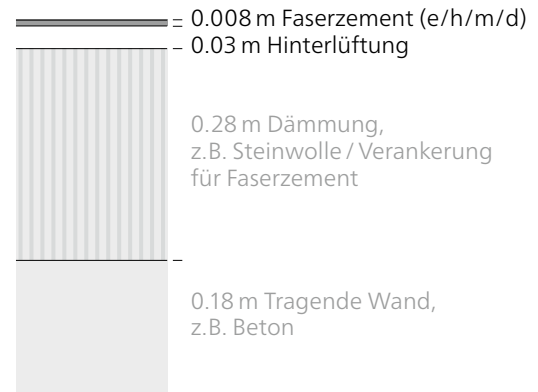


mittel



dunkel

Aufbau

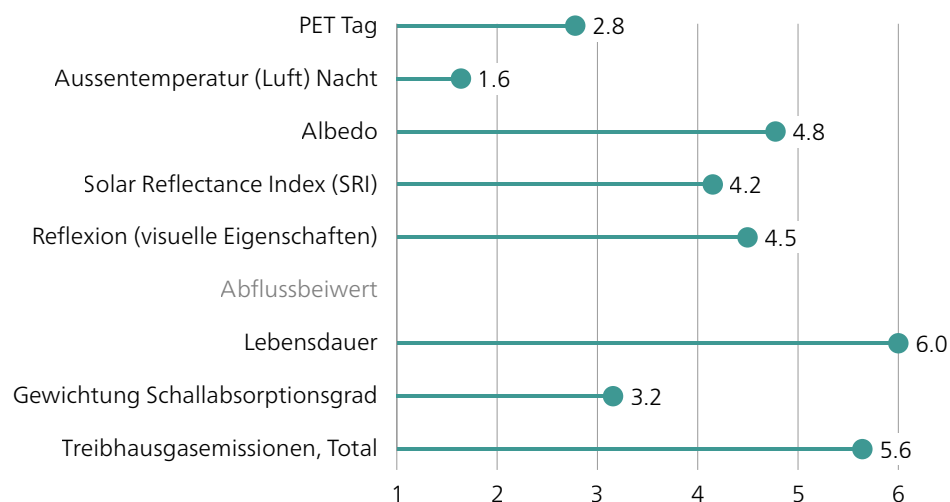


Materialdaten

		Faserzement	F. hell	F. mittel	F. dunkel
PET Tag	°C	37.7	38.7	36.4	35.3
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.9	22.9	22.9	22.9
Albedo	–	0.63	0.75	0.45	0.26
Solar Reflectance Index (SRI)	–	63	86	53	35
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.30	0.70	0.50	0.25
Abflussbeiwert	–	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Lebensdauer	a	50	50	50	50
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.40	0.40	0.40	0.40
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	16.5	16.5	16.5	16.5

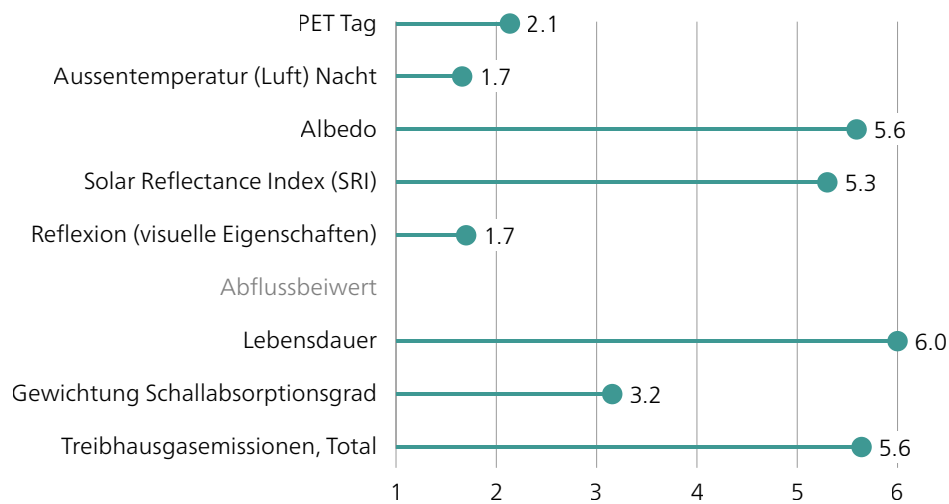
Bewertung

Faserzement

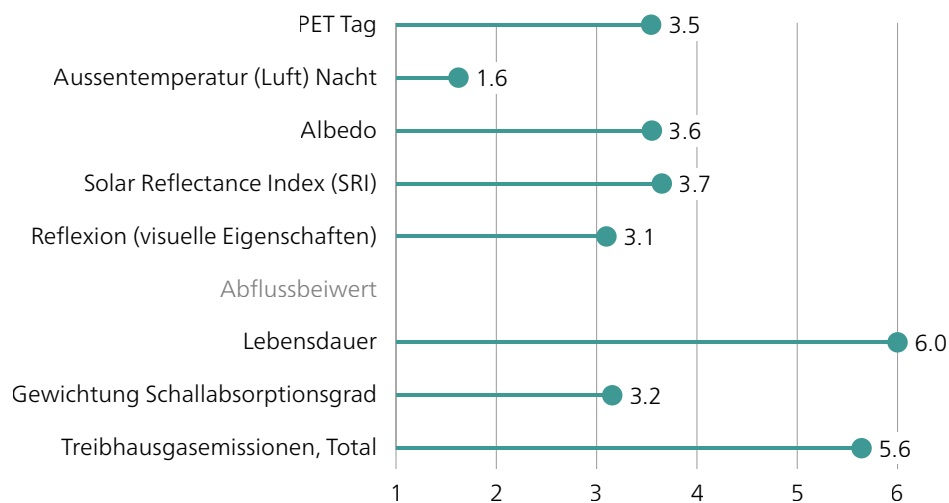


Bewertung

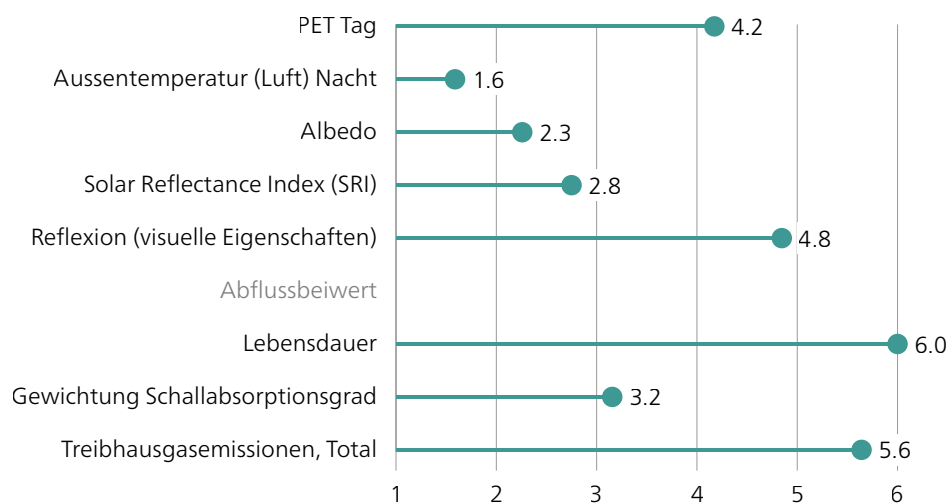
Faserzement, hell



Faserzement, mittel



Faserzement, dunkel



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Faserzement				
			Kennwert	hell	mittel	dunkel	(m)
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'000				0.008
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.10				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'100				
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.20				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.48				
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
	a (D)	m^2/s	2.2E-07				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'028				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.03				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.06				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.077				
Albedo	α	–	0.63	0.75	0.45	0.26	
Emissivität	ε	–	0.90	0.85	0.90	0.95	
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	63.0	86.0	53.0	35.0	
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.30	0.70	0.50	0.25	
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	5.00	n.a.	0.00	0.00	
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.				
Abflussbeiwert	ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	50				
Unterhalt			nein				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	0.67				
f_m 250		–	0.21				
f_m 500		–	0.14				
f_m 1000		–	0.07				
f_m 2000		–	0.06				
f_m 4000		–	0.05				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	1'510				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	24'160				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	1.03				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	16				
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.9	22.9	22.9	22.9	
PET Tag	PET	°C	37.7	38.7	36.4	35.3	

		Literatur
Gesamt		Faserzement
spez. KW	spez.KW	
16.00		Zürcher
		Zürcher
		Zürcher
		Alchapar
		Alchapar
		Alchapar
		Hauser
		BNB
		Willems
		Willems
		Willems
		Willems
		Willems
		Willems
		KBOB
	24'160	
		KBOB
	16	

Literatur:

- N. Alchapar, E. Correa, A. Cantón, G. Lesino, 2011. *Urban Heat Island Mitigation. Classification of Building Materials Used in the Urban Envelopes According their Capacity for Cooling the City*, in: Proceedings of the ISES Solar World Congress 2011. International Solar Energy Society, Kassel, Germany, pp. 1–12. <https://doi.org/10.18086/swc.2011.02.01>
- BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen 2017*, Berlin, 2017.
- G. Hauser, *Bauphysikalische Grundlagen Feuchtelehre – Vorlesungsskript Bauphysik I und II*, Kassel, 2003.
- KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009 / 1:2022 (V6.2)*. Schweiz, 2022.
- W. M. Willems, K. Schild, S. Dinter, D. Stricker (Eds.), 2010, *Formeln und Tabellen Bauphysik: Wärmeschutz – Feuchteschutz – Klima – Akustik – Brandschutz*; 2., aktualisierte und erw. Aufl., Vieweg+Teubner, Wiesbaden.
- C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

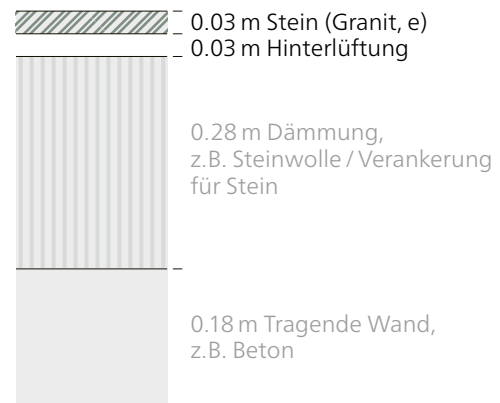
4.4.5 Kunststein / Natursteinverkleidung (HF_Steinverkleidung)

Ansicht



Quelle: www.linea-cladding.com

Aufbau

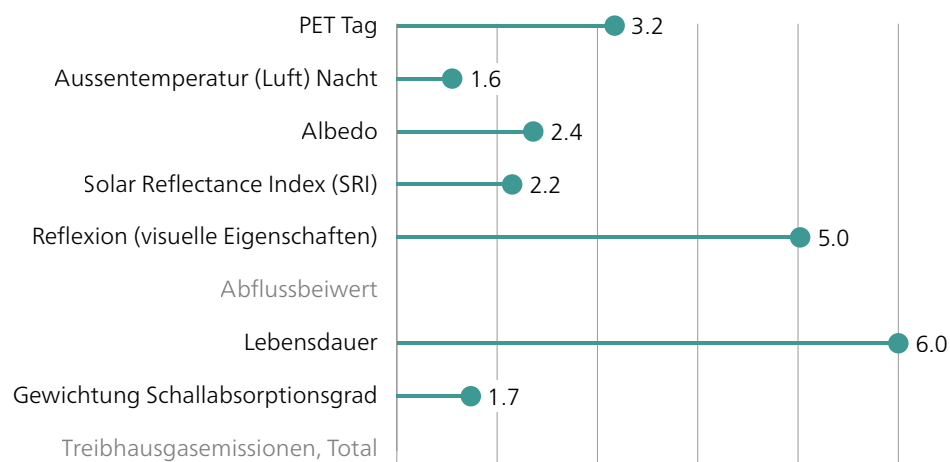


Materialdaten

		Granit
PET Tag	°C	37.0
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.9
Albedo	–	0.28
Solar Reflectance Index (SRI)	–	23
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.23
Abflussbeiwert	–	n.a.
Lebensdauer	a	50
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.20
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!

Bewertung

Granit



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			Literatur
			Granit		Gesamt	Granit
			Kennwert	(m)	spez. KW	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'750	0.03	82.50	Zürcher
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.80			
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	800			Zürcher
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.20			
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$				
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	2.80			Zürcher
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$				
	a (D)	m^2/s	1.3E-06			
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	2'482			
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	2.48			
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.15			
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.187			
Albedo	α	–	0.28			Radhi
Emissivität	ε	–	0.90			Radhi
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	23.0			Radhi
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.23			Hentschel
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	0.08			Scheffler
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.			
Abflussbeiwert	Ψ	–	n.a.			
Lebensdauer	a	–	50			BNB
Unterhalt			nein			
Nachrüstbarkeit			ja			
Stromproduktion			nein			
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–				
f_m 125		–	0.02			Bobran
f_m 250		–	n.a.			
f_m 500		–	0.05			Bobran
f_m 1000		–	n.a.			
f_m 2000		–	0.04			Bobran
f_m 4000		–	n.a.			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!		#WERT!	
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!		#WERT!	
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.9			
PET Tag	PET	°C	37.0			

Literatur:

BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen* 2017, Berlin, 2017.

H. W. Bobran and I. Bobran-Wittfoht, *Handbuch der Bauphysik*, 8th ed. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co KG, 2010.

H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung*, 5th ed. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2002.

H. Radhi, E. Assem, and S. Sharples, *On the colours and properties of building surface materials to mitigate urban heat islands in highly productive solar regions*, Build. Environ., vol. 72, pp. 162–172, 2014.

G. A. Scheffler and R. Plagge, *Ein Trocknungskoeffizient für Baustoffe*, Bauphysik, vol. 31, no. 3, pp. 125–138, 2009.

C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

4.4.6 Vorgehängtes Begrünungselement (HF_Begrünungselement)

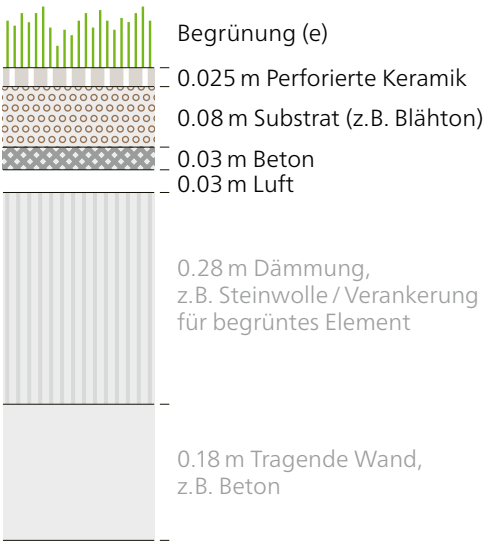
Ansicht



Quelle: Skyflor

Kommentar Aufbau: Die Begrünung durchdringt die perforierte Keramik und wurzelt im Blähton.

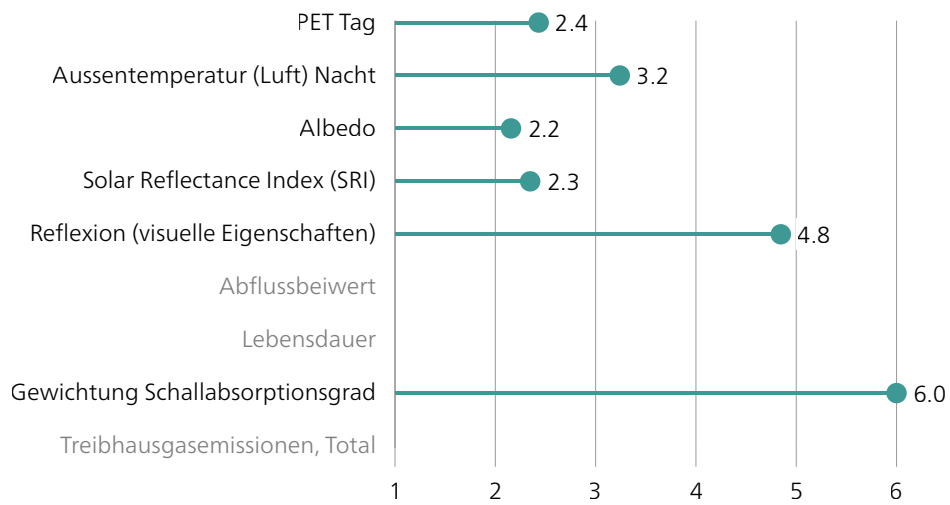
Aufbau



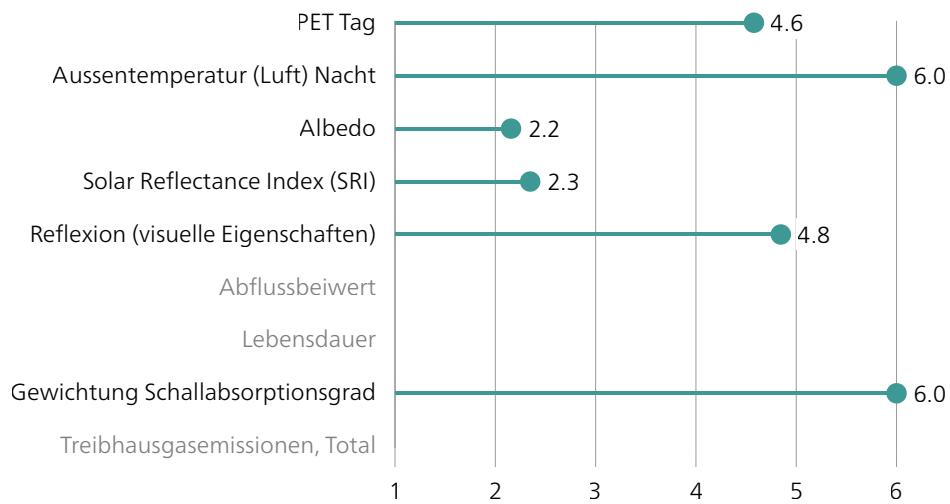
Materialdaten		Bepflanzung trocken und Element	Bepflanzung feucht und Element
PET Tag	°C	38.2	34.6
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.4	21.4
Albedo	–	0.25	0.25
Solar Reflectance Index (SRI)	–	27	27
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.25	0.25
Abflussbeiwert	–	n.a.	n.a.
Lebensdauer	a	n.a.	n.a.
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.79	0.79
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!	#WERT!

Bewertung

Bepflanzung trocken und Element



Bepflanzung feucht und Element



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			
			Bepflanzung und Element			Gesamt
			trocken	feucht		
			Kennwert	Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'481		0.135	199.94
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.80			
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	800			
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.18			
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$				
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.50			
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$				
	a (D)	m^2/s	4.2E-07			
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	770			
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.77			
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.05			
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.108			
Albedo	α	–	0.25			
Emissivität	ε	–	0.94			
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	27.0			
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.25			
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.			
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.			
Abflussbeiwert	ψ	–	n.a.			
Lebensdauer	a	–	n.a.			
Unterhalt			ja			
Nachrüstbarkeit			ja			
Stromproduktion			nein			
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–				
f_m 125		–	0.13			
f_m 250		–	0.31			
f_m 500		–	0.71			
f_m 1000		–	0.85			
f_m 2000		–	0.75			
f_m 4000		–	0.83			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!			#WERT!
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!			#WERT!
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.4	21.4		
PET Tag	PET	°C	38.2	34.6		

Literatur	Element
1. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 2. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 3. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 4. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 5. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 6. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 7. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 8. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 9. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 10. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel	1. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 2. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 3. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 4. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 5. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 6. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 7. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 8. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 9. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel 10. <i>Die Kunst des klugen Handelns</i> von Friedrich Schlegel

Skyflor

Zürcher

Skyflor

Victorero
Victorero
Victorero
Witting

Empa
Empa
Empa
Empa
Empa
Empa

Literatur:

Empa, *Prüfbericht Nr. 5214.007431: Luftschalldämmung und Schallabsorption Lärmschutzwand- und Fassadensystem <Skyflor>*, Dübendorf, 2014.

P. Gallinelli, D. Varesano, S. Polli, and M. Sanchez, *Rapport final mesure valeur lamda en cellule thermique*, Genf, 2014.

F. Victorero, S. Vera, W. Bustamante, and F. Tori, *Experimental study of the thermal performance of living walls under semi-arid climatic conditions*, in 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015, 2015, pp. 3416–3422.

W. Witting, *Licht. Sehen. Gestalten*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag, 2014.

C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

4.5 Reflektierende Anstriche Wand

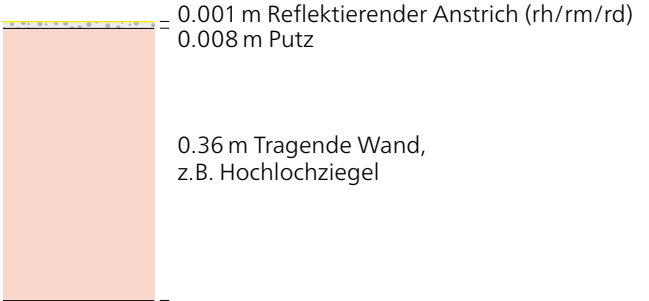
4.5.1 Reflektierender Anstrich auf Putz und Einschalenmauerwerk (Reflektierender_Anstrich)

Ansicht

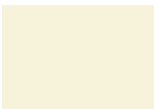


Quelle: unbekannt

Aufbau



Farbvarianten



hell



mittel



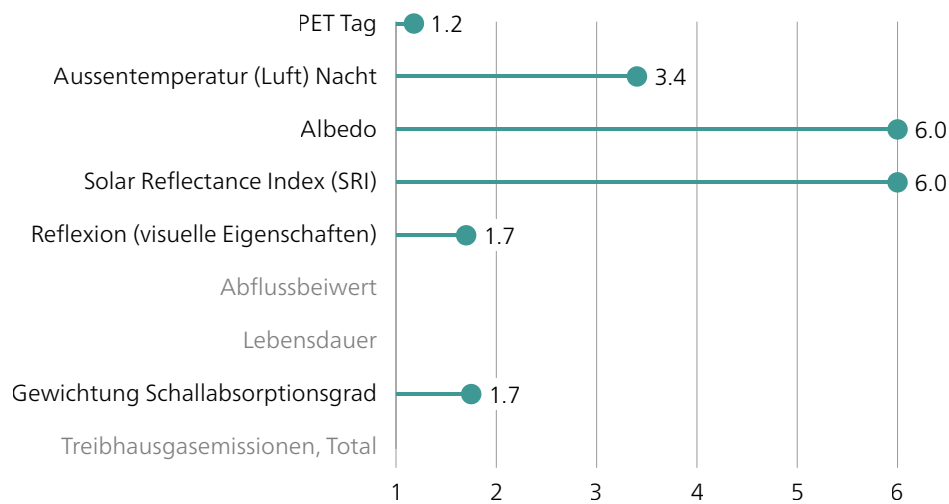
dunkel

Materialdaten		hell	mittel	dunkel
PET Tag	°C	40.3	39.5	38.1
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.3	22.6	22.7
Albedo	–	0.81	0.69	0.42
Solar Reflectance Index (SRI)	–	100	83	50
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.70	0.50	0.25
Abflussbeiwert	–	n.a.	n.a.	n.a.
Lebensdauer	a	n.a.	n.a.	n.a.
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.20	0.20	0.20
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!	#WERT!	#WERT!

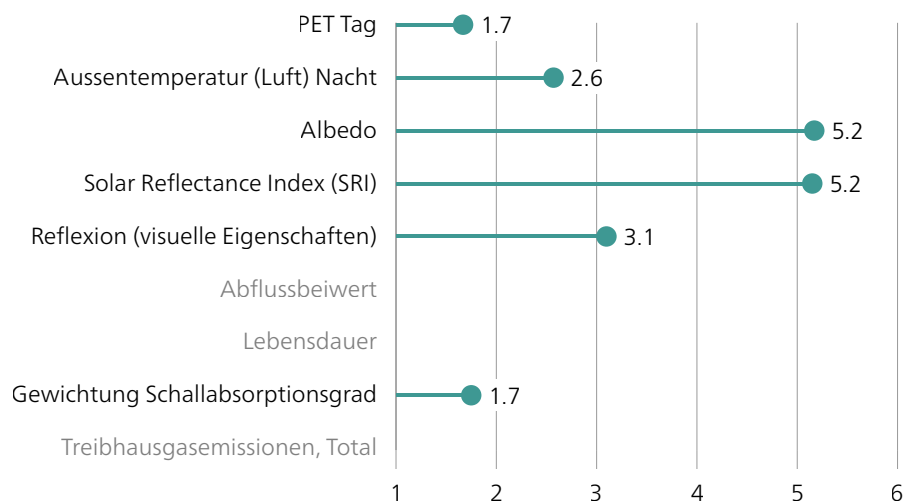
Kommentare: Das verwendete Produkt ist bezüglich seiner Ökovertäglichkeit auf das Grundwasser zu überprüfen. Das Schweizer Chemikalienrecht (ChemG, SR 813.1) sieht dazu verschiedene Anforderungen vor, welche weitgehend mit dem europäischen Chemikalienrecht harmonisiert sind.

Bewertung

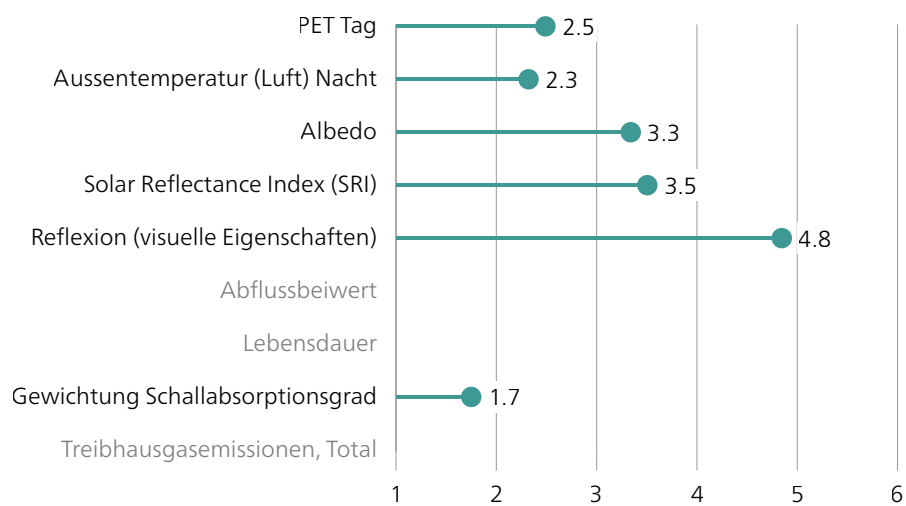
Reflektierender Anstrich, hell



Reflektierender Anstrich, mittel



Reflektierender Anstrich, dunkel



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Reflektierender Anstrich				
			hell	mittel	dunkel	(m)	spez. KW
			Kennwert	Kennwert	Kennwert		
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'050			0.001	1.05
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.50				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'500				
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.58				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.20				
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
	a (D)	m^2/s	1.3E-07				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	561				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.56				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.03				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.059				
Albedo	α	–	0.81	0.69	0.42		
Emissivität	ϵ	–	0.89	0.89	0.87		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	100.0	83	50		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.70	0.50	0.25	0.00	
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.				
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	0.20				
Abflussbeiwert	Ψ	–	n.a.				
Lebensdauer	a	–	n.a.				
Unterhalt			ja				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	0.02				
f_m 250		–	0.02				
f_m 500		–	0.03				
f_m 1000		–	0.04				
f_m 2000		–	0.05				
f_m 4000		–	0.05				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!				
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.3	22.6	22.7		
PET Tag	PET	°C	40.3	39.5	38.1		

Anmerkungen: Das verwendete Produkt ist bezüglich seiner Ökoverträglichkeit auf das Grundwasser zu überprüfen. Das Schweizer Chemikalienrecht (ChemG, SR 813.1) sieht dazu verschiedene Anforderungen vor, welche weitgehend mit dem europäischen Chemikalienrecht harmonisiert sind.

4.6 Umgebung Boden

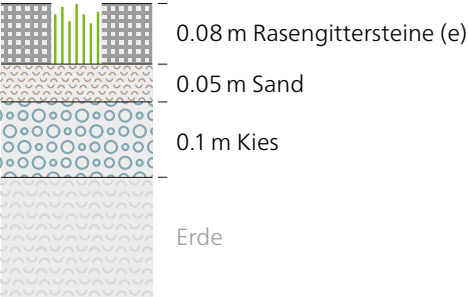
4.6.1 Rasengittersteinpflasterung für Wege/befahrbare Flächen (B_Rasengittersteinpflasterung)

Ansicht



Quelle: www.plantopedia.de

Aufbau

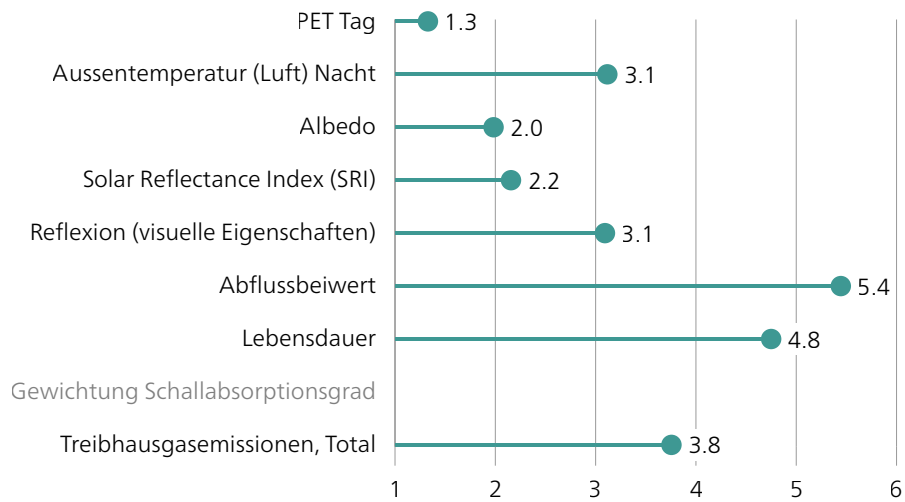


Materialdaten		Rasengitterstein
PET Tag	°C	38.2
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.7
Albedo	–	0.25
Solar Reflectance Index (SRI)	–	27
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.25
Abflussbeiwert	–	0.20
Lebensdauer	a	30
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	20.3

Kommentare: Für die Erde in den Rasengittersteinen sind keine Daten zum Umweltbelastungspunkten und Treibhausgasemissionen vorhanden. Stattdessen werden die Werte für Split eingesetzt.

Bewertung

Rasengitterstein



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien					
			Rasengitterstein			Sand		
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)	
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'450	0.08	116	1'700	0.05	
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.06					
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'060			1'300		
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.54					
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB) λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$						
		$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	2.00			1.60		
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB) a (D)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$						
		m^2/s	1.3E-06					
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'753					
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.75					
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.11					
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.189					
Albedo	α	–	0.25					
Emissivität	ϵ	–	0.93					
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	26.6					
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.25					
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.					
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	1.80					
Abflussbeiwert	Ψ	–	0.20					
Lebensdauer	a	–	30					
Unterhalt			ja					
Nachrüstbarkeit			ja					
Stromproduktion			nein					
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–						
f_m 125		–	n.a.					
f_m 250		–	n.a.					
f_m 500		–	n.a.					
f_m 1000		–	n.a.					
f_m 2000		–	n.a.					
f_m 4000		–	n.a.					
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	236			59		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	27'368			5'049		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.14			0.016		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	16			1		
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.7					
PET Tag	PET	°C	38.2					

Anmerkungen: Für die Erde in den Rasengittersteinen sind keine Daten zum Umweltbelastungspunkten und Treibhausgasemissionen vorhanden. Statt dessen wurden die Werte für Split eingesetzt.

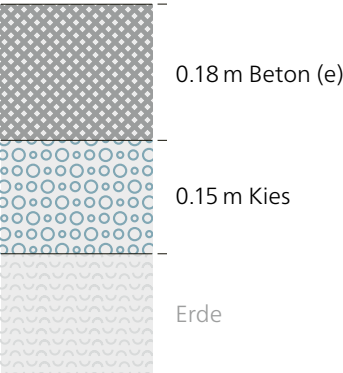
4.6.2 Betonbelag
(B_Betonbelag)

Ansicht



Quelle: Martin van Maaren auf Unsplash

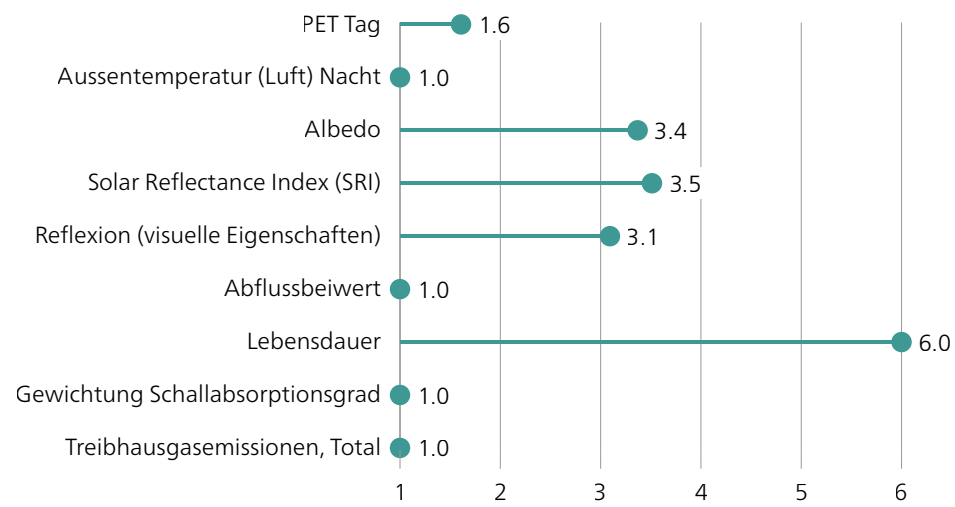
Aufbau



Materialdaten		Beton
PET Tag	°C	37.9
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.9
Albedo	–	0.38
Solar Reflectance Index (SRI)	–	44
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.25
Abflussbeiwert	–	1.00
Lebensdauer	a	35
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.13
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	44.2

Bewertung

Beton



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien					
			Beton			Kies		
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)	
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'200	0.18	396.00	1'800	0.15	
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.07					
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'070			710		
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.35					
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB) λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$						
		$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.60			0.70		
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB) a (D)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$						
		m^2/s	6.8E-07					
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'941					
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.94					
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.12					
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.137					
Albedo	α	–	0.38					
Emissivität	ε	–	0.95					
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	43.8					
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.25					
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.					
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	1.80					
Abflussbeiwert	Ψ	–	1.00					
Lebensdauer	a	–	35					
Unterhalt			ja					
Nachrüstbarkeit			ja					
Stromproduktion			nein					
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–						
f_m 125		–	0.01					
f_m 250		–	0.01					
f_m 500		–	0.02					
f_m 1000		–	0.02					
f_m 2000		–	0.02					
f_m 4000		–	0.02					
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	153			59		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	60'588			16'038		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.10			0.016		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	40			4		
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.9					
PET Tag	PET	°C	37.9					

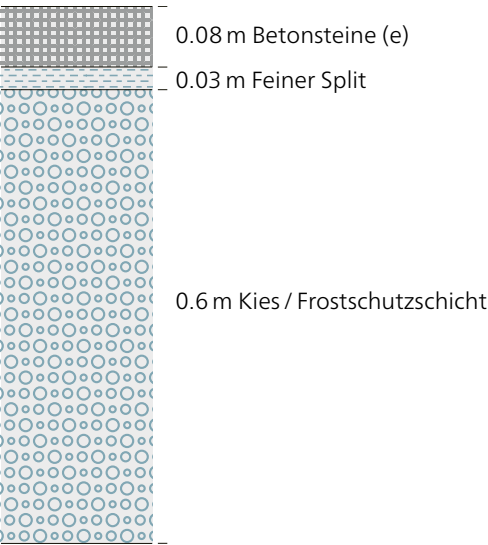
4.6.3 Betonsteinpflasterung für Wege, befahrbar (B_Betonsteinpflasterung)

Ansicht



Quelle: Carl Raw auf Unsplash

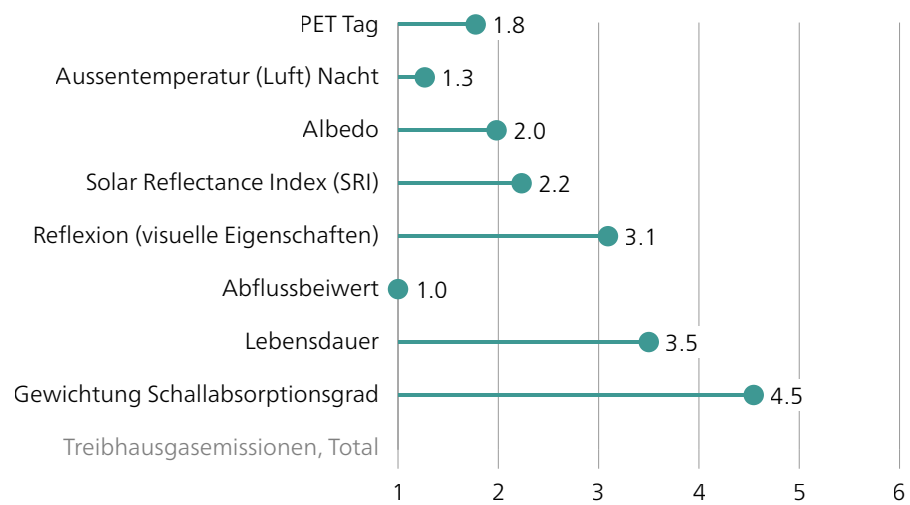
Aufbau



Materialdaten		Betonsteinpflasterung
PET Tag	°C	37.7
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.9
Albedo	–	0.25
Solar Reflectance Index (SRI)	–	28
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.25
Abflussbeiwert	–	1.00
Lebensdauer	a	25
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.63
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!

Bewertung

Betonsteinpflasterung



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien					
			Betonsteinpflasterung			Split		
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)	
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'000	0.08	160.00	1'700	0.03	
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.08					
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'080			1'800		
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.16					
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$						
		λ (D)	1.20			1.50		
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$						
		a (D)	5.6E-07					
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'610					
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.61					
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.10					
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.124					
Albedo	α	–	0.25					
Emissivität	ε	–	0.95					
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	27.6					
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.25					
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	0.03					
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	1.80					
Abflussbeiwert	Ψ	–	1.00					
Lebensdauer	a	–	25					
Unterhalt			ja					
Nachrüstbarkeit			ja					
Stromproduktion			nein					
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–						
f_m 125		–	0.36					
f_m 250		–	0.44					
f_m 500		–	0.31					
f_m 1000		–	0.29					
f_m 2000		–	0.39					
f_m 4000		–	0.25					
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.			65		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!			3'305		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.			0.02		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!			1		
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.9					
PET Tag	PET	°C	37.7					

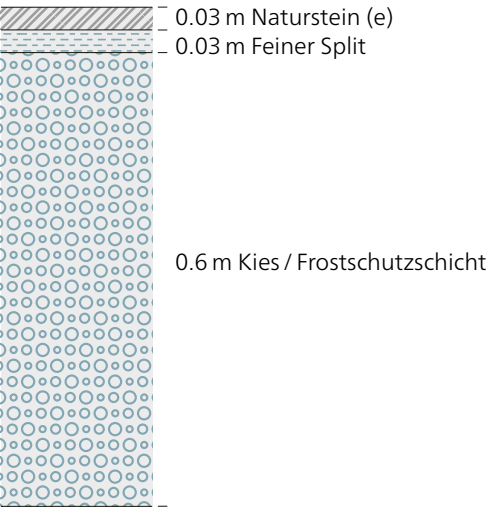
4.6.4 Steinplattenpflasterung für Wege (B_Steinplattenpflasterung)

Ansicht



Quelle: www.torriani-sa.ch

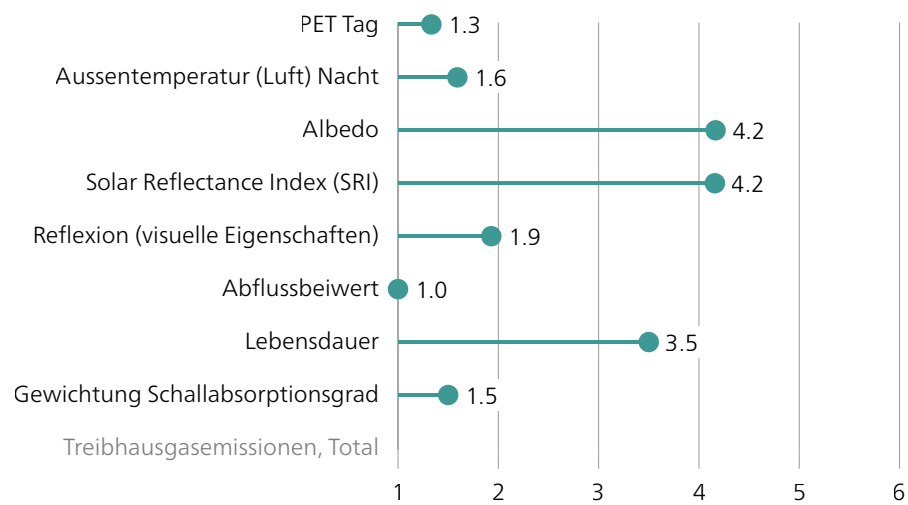
Aufbau



Materialdaten		Sandstein
PET Tag	°C	38.2
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.9
Albedo	–	0.45
Solar Reflectance Index (SRI)	–	52
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.30
Abflussbeiwert	–	1.00
Lebensdauer	a	25
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.20
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!

Bewertung

Sandstein



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien					
			Sandstein			Split		
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)	
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'000	0.03	60.00	1'700	0.03	
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.10					
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'100			1'800		
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.20					
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$						
		λ (D)	1.10			1.50		
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$						
		a (D)	5.0E-07					
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'556					
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.56					
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.09					
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.117					
Albedo	α	–	0.45					
Emissivität	ϵ	–	0.92					
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	52.0					
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.30					
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	0.05					
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	3.20					
Abflussbeiwert	Ψ	–	1.00					
Lebensdauer	a	–	25					
Unterhalt			ja					
Nachrüstbarkeit			ja					
Stromproduktion			nein					
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–						
f_m 125		–	0.02					
f_m 250		–	0.02					
f_m 500		–	0.03					
f_m 1000		–	0.04					
f_m 2000		–	0.05					
f_m 4000		–	0.05					
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.			65		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!			3'305		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.			0.01		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!			1		
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.9					
PET Tag	PET	°C	38.2					

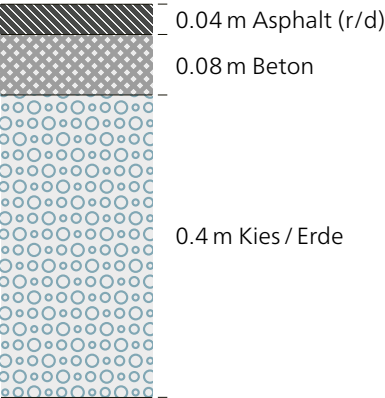
4.6.5 Schwarzbelag (Asphalt) (B_Aspphalt)

Ansicht



Quelle: sq lim auf Unsplash

Aufbau



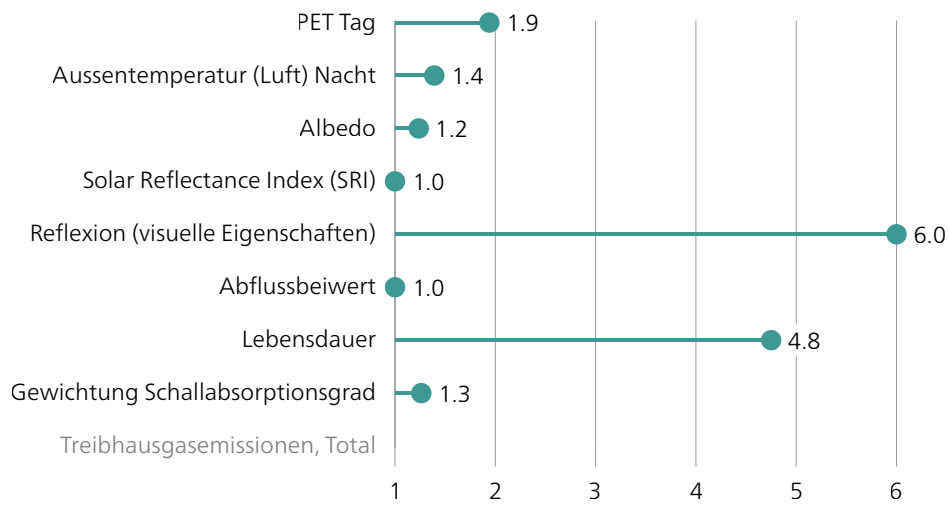
Farbvarianten



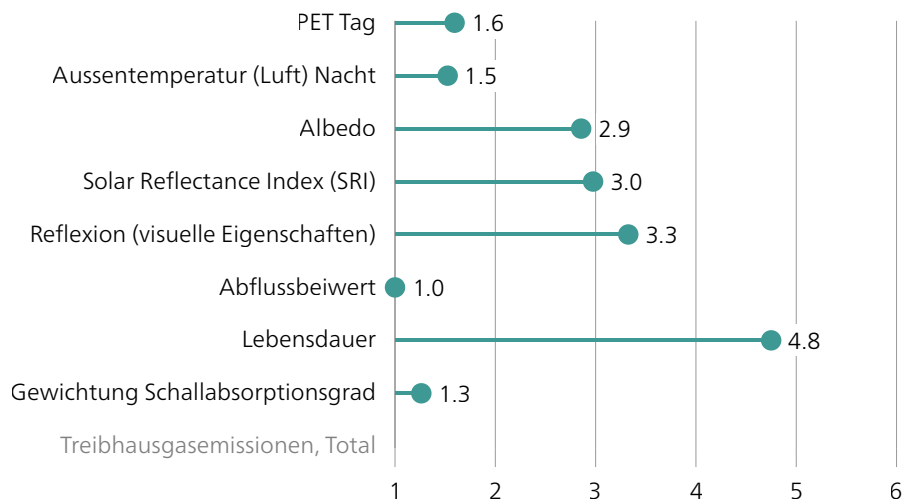
Materialdaten		Standard	reflektierend
PET Tag	°C	37.6	37.9
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.9	22.9
Albedo	–	0.18	0.33
Solar Reflectance Index (SRI)	–	12	37
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.13	0.24
Abflussbeiwert	–	1.00	1.00
Lebensdauer	a	30	30
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.17	0.17
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!	#WERT!

Bewertung

Asphalt, Standard



Asphalt, reflektierend



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			
			Asphalt		Beton	
			Standard	reflekt.		
			Kennwert	Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'200		0.04	88.00
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.50			
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'500			
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	3.30			
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$				
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.70			1.60
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$				
	a (D)	m^2/s	2.1E-07			
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'520			
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.52			
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.09			
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.076			
Albedo	α	–	0.18	0.33		
Emissivität	ε	–	0.82	0.94		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	12.00	37.00		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.13	0.24		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.			
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.			
Abflussbeiwert	ψ	–	1.00			
Lebensdauer	a	–	30	n.a.		
Unterhalt			nein	ja		
Nachrüstbarkeit			ja	ja		
Stromproduktion			nein	nein		
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–				
f_m 125		–	0.02			
f_m 250		–	0.03			
f_m 500		–	0.03			
f_m 1000		–	0.03			
f_m 2000		–	0.03			
f_m 4000		–	0.02			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.			153
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!			26'928
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.			0.10
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!			18
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.9	22.9		
PET Tag	PET	°C	37.6	37.9		

Literatur:

U. Agethen, K.-J. Frahm, K. Renz, and E. P. Thees, *Arbeitsblatt der BTE Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte*, Essen, 2008.

H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung*, 5th ed. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2002.

KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 (V6.2)*. Schweiz, 2022.

S. Kotthaus, T. E. L. Smith, M. J. Wooster, and C. S. B. Grimmond, *Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy*, ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., vol. 94, pp. 194–212, 2014.

G.-E. Kyriakidis and M. Santamouris, *Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates – Results from a large scale urban mitigation project*, Urban Clim., vol. 24, pp. 326–339, 2018.

					Literatur			
Kies					Gesamt	Asphalt Standard	Asphalt reflekt.	Beton/Kies
(m)	spez. KW	Kennwert	(m)	spez. KW	spez. KW			
0.08	176.00	1'800	0.5	900.00		Zürcher	Zürcher	Zürcher
		710				Zürcher	Zürcher	Zürcher
		0.70				Zürcher	Zürcher	Zürcher
						Kotthaus	StreetBond	
						Kotthaus	StreetBond	
						Uzarowski	StreetBond	
						Hentschel	Santamouris	
						SN 592000:2012	SN 592000:2012	
						Agethen	Uzarowski	
						PTB		
						PTB		
						PTB		
						PTB		
						PTB		
						PTB		
		59						KBOB
		53'460			#WERT!			
		0.02						KBOB
		14			#WERT!			

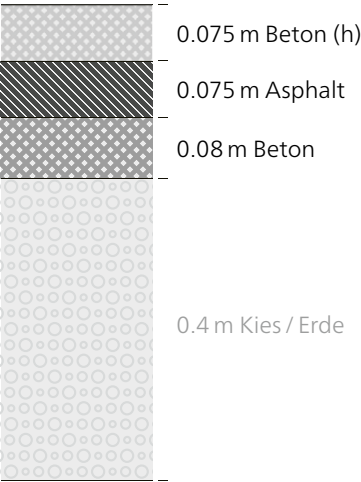
4.6.6 Whitetopping auf Asphalt (B_Whitetopping_auf_Asphalt)

Ansicht



Quelle: Lousiana Department of Transportation and Development, DOTD, USA.

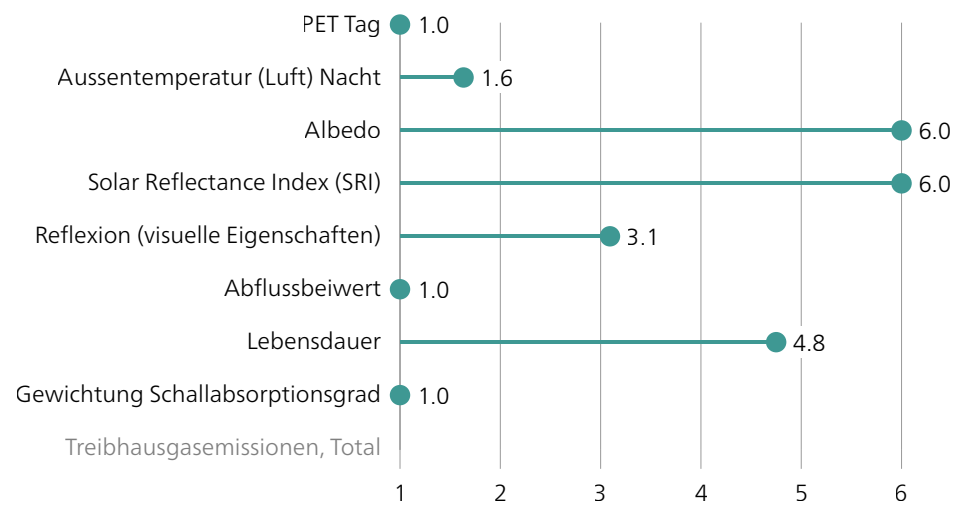
Aufbau



Materialdaten		Beton, hell
PET Tag	°C	38.5
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.8
Albedo	–	0.62
Solar Reflectance Index (SRI)	–	75
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.25
Abflussbeiwert	–	1.00
Lebensdauer	a	30
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.13
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!

Bewertung

Beton, hell



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien					
			Beton, hell			Asphalt		
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)	
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'400	0.08	180.00	2'200	0.08	
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.06					
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'060			1'500		
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.54					
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB) λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$						
		$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	2.00			0.70		
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB) a (D)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$						
		m^2/s	7.9E-07					
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	2'256					
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	2.26					
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.14					
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.147					
Albedo	α	–	0.62					
Emissivität	ϵ	–	0.93					
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	75.3					
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.25					
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	1.80					
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.					
Abflussbeiwert	Ψ	–	1.00					
Lebensdauer	a	–	30					
Unterhalt			ja					
Nachrüstbarkeit			ja					
Stromproduktion			nein					
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–						
f_m 125		–	0.01					
f_m 250		–	0.01					
f_m 500		–	0.02					
f_m 1000		–	0.02					
f_m 2000		–	0.02					
f_m 4000		–	0.02					
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.			n.a.		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!			#WERT!		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.			n.a.		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!			#WERT!		
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.8					
PET Tag	PET	°C	38.5					

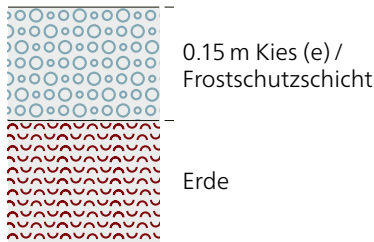
4.6.7 Kiesbelag
(B_Kiesbelag)

Ansicht



Quelle: www.meyerkieswerk.ch

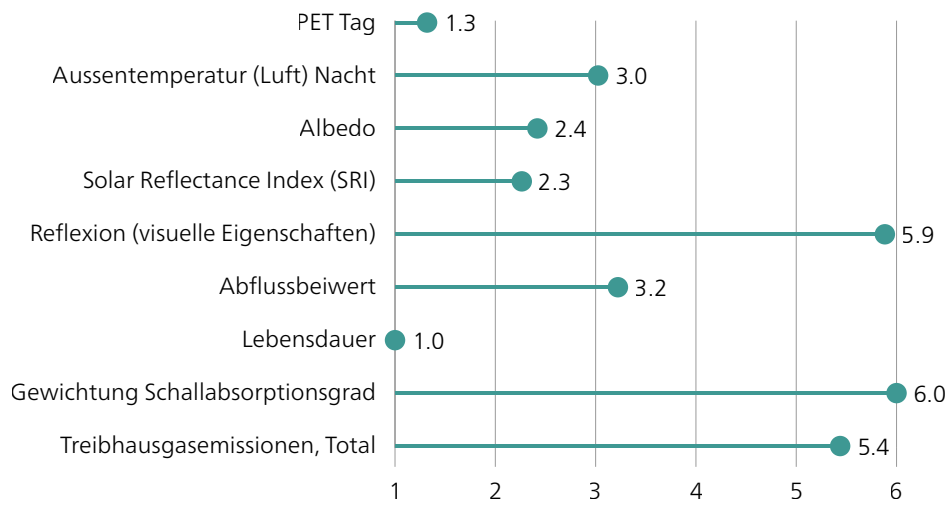
Aufbau



Materialdaten		Kies
PET Tag	°C	38.2
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.7
Albedo	–	0.29
Solar Reflectance Index (SRI)	–	28
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.13
Abflussbeiwert	–	0.60
Lebensdauer	a	15
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.84
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	5.7

Bewertung

Kies



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien					
			Kies			Erde		
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)	
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'800	0.2	360.00	1'700	0.5	
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.71					
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	710			1'420		
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.28					
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB) λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$						
		$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.70			0.70		
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB) a (D)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$						
		m^2/s	5.5E-07					
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	946					
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.95					
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.06					
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.123					
Albedo	α	–	0.29					
Emissivität	ϵ	–	0.90					
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	28.0					
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.13					
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.					
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.					
Abflussbeiwert	Ψ	–	0.60					
Lebensdauer	a	–	15					
Unterhalt			ja					
Nachrüstbarkeit			ja					
Stromproduktion			nein					
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–						
f_m 125		–	0.24					
f_m 250		–	0.60					
f_m 500		–	0.65					
f_m 1000		–	0.70					
f_m 2000		–	0.75					
f_m 4000		–	0.80					
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	59					
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	21'384					
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.02					
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	6					
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.7					
PET Tag	PET	°C	38.2					

spez. KW	Gesamt spez. KW	Literatur	
		Kies	Erde
850.00		Schild	Zürcher
		Lassacher	
		Lassacher	Zürcher
		Schild	Zürcher
		Pisello	
		Pisello	
		Pisello	
		Dorno	
		SN 592000:2012	
		Agethen	
		PTB	
		PTB	
		PTB	
		PTB	
		PTB	
		PTB	
		KBOB	
	21'384		
		KBOB	
	6		

Literatur:

- U. Agethen, K.-J. Frahm, K. Renz, and E. P. Thees, *Arbeitsblatt der BTE Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte*, Essen, 2008.
- C. Dorno, *Allgemeine aus Meteorologie und Klimatologie, Strahlung, Spezifisch-medizinische Klimatologie und Höhenklima*, 1st ed. Paderborn: Salzwasser Verlag GmbH, 1924.
- KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 (V6.2)*. Schweiz, 2022.
- S. Lassacher, S. Puschnigg, and J. Lindorfer, *Technische Aspekte der Forcierung von Primärenergieeffizienz von oberösterreichischen Produktionsstandorten durch Nutzung von Wärmespeichern*, Linz, 2018.
- A. L. Pisello, V. L. Castaldo, G. Pignatta, and F. Cotana, *Experimental analysis of natural gravel covering as cool roof and cool pavement*, in 14th CIRIAF National Congress – Energy, Environment and Sustainable Development, 2014, pp. 1–17.
- PTB, *Absorptionstabelle abstab_wf.xls*, 2020 [Online]. Available: www.ptb.de [Accessed: 08-Sep-2020].
- K. Schild and W. M. Willems, *Wärmeschutz*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- SN 592000:2012, *Anlagen für die Liegenschaftsentwässerung – Planung und Ausführung*, 2012, pp. 1–204.
- C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

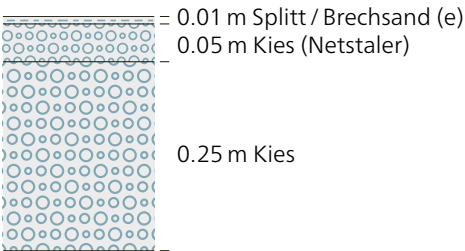
4.6.8 **Chaussierung (Wassergebundene Deckschicht)**
(B_Chaussierung)

Ansicht



Quelle: <https://georgmuellerag.ch>

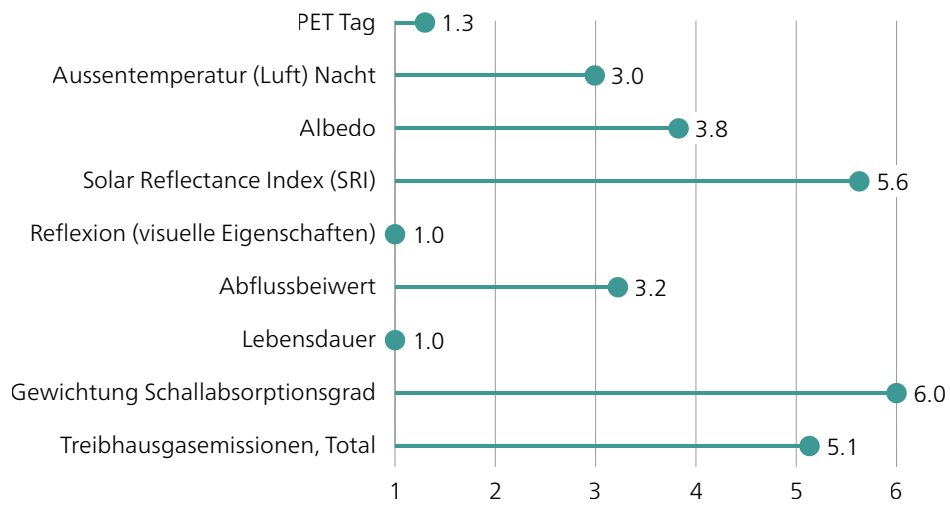
Aufbau



Materialdaten		Splitt/Brechsand
PET Tag	°C	38.2
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.7
Albedo	–	0.42
Solar Reflectance Index (SRI)	–	71
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.34
Abflussbeiwert	–	0.60
Lebensdauer	a	15
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	0.84
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	8.3

Bewertung

Splitt/Brechsand



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien					
			Splitt/Brechsand			Kies (Netstaler)		
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)	
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'700	0.01	17.00	1'700	0.05	
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.71					
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'420			1'420		
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.41					
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$						
		λ (D)	0.70			0.70		
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$						
		a (D)	2.9E-07					
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'300					
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.30					
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.08					
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.089					
Albedo	α	–	0.42					
Emissivität	ϵ	–	0.94					
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	70.6					
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.34					
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.					
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.					
Abflussbeiwert	Ψ	–	0.60					
Lebensdauer	a	–	15					
Unterhalt			ja					
Nachrüstbarkeit			ja					
Stromproduktion			nein					
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–						
f_m 125		–	0.24					
f_m 250		–	0.60					
f_m 500		–	0.65					
f_m 1000		–	0.70					
f_m 2000		–	0.75					
f_m 4000		–	0.80					
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	65			59		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	1'102			5'049		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.02			0.02		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	0.30			1.33		
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.7					
PET Tag	PET	°C	38.2					

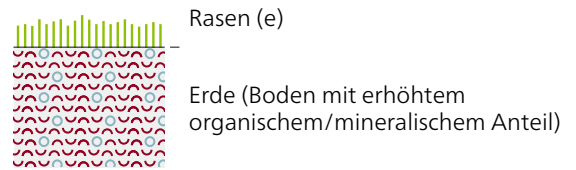
4.6.9 Rasen (B_Rasen)

Ansicht



Quelle: Bradley Brister auf Unsplash

Aufbau



Materialdaten

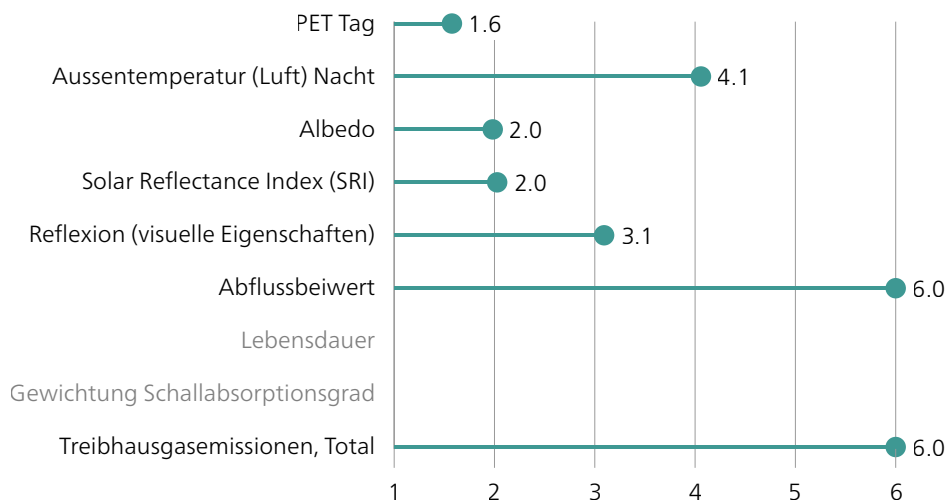
		trocken, Sonne	feucht, Sonne	trocken, Bäume, Boden, org. Anteil	trocken, Bäume, Boden, min. Anteil
PET Tag	°C	37.9	35.4	34.5	35.4
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.6	22.4	22.4	22.5
Albedo	–	0.25	0.25	0.25	0.25
Solar Reflectance Index (SRI)	–	25	25	25	25
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.25	0.25	0.25	0.25
Abflussbeiwert	–	0.10	0.10	0.10	0.10
Lebensdauer	a	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	0.8	0.8	#WERT!	0.8

Kommentare: Für den natürlich vorhandenen Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil sind keine Daten zu Umweltbelastungspunkten und Treibhausgasemissionen vorhanden. Stattdessen werden die Werte für Split eingesetzt. Beim Boden mit erhöhtem organischem Anteil kann kein Ersatzwert angenommen werden, da die Zusammensetzung und der Anteil möglicher organischer Stoffe zu unterschiedlich sind. Der Abbau von Torf selber ist in der Schweiz verboten und das Torfausstiegskonzept des Bundes lehnt einen Import ab (siehe auch [«Infobox: Böden für Grünflächen»](#)).

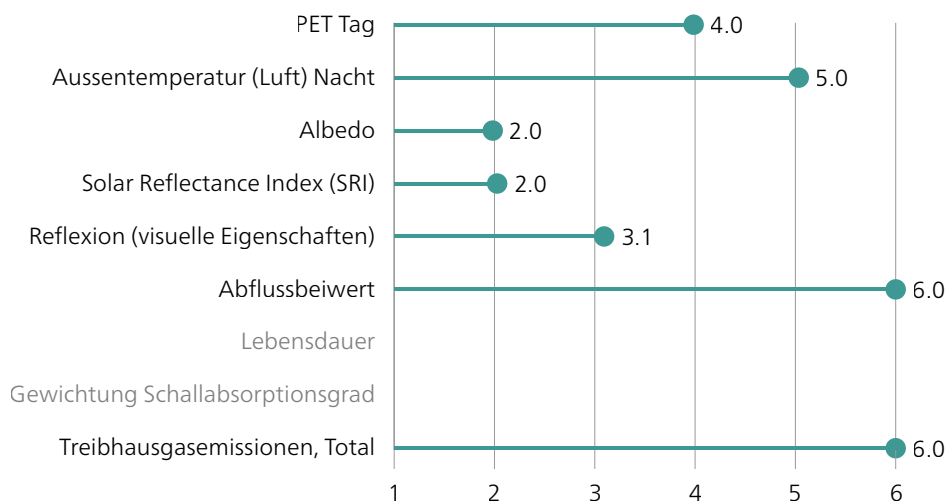
trocken, Boden, org. Anteil	trocken, Boden, min. Anteil	feucht, Bäume, Boden, org. Anteil	feucht, Bäume, Boden, min. Anteil	feucht, Boden, org. Anteil	feucht, Boden, min. Anteil
36.9	38.0	33.4	33.4	35.5	35.4
22.5	22.6	22.3	22.3	22.4	22.4
0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
25	25	25	25	25	25
0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
#WERT!	0.8	#WERT!	0.8	#WERT!	0.8

Bewertung

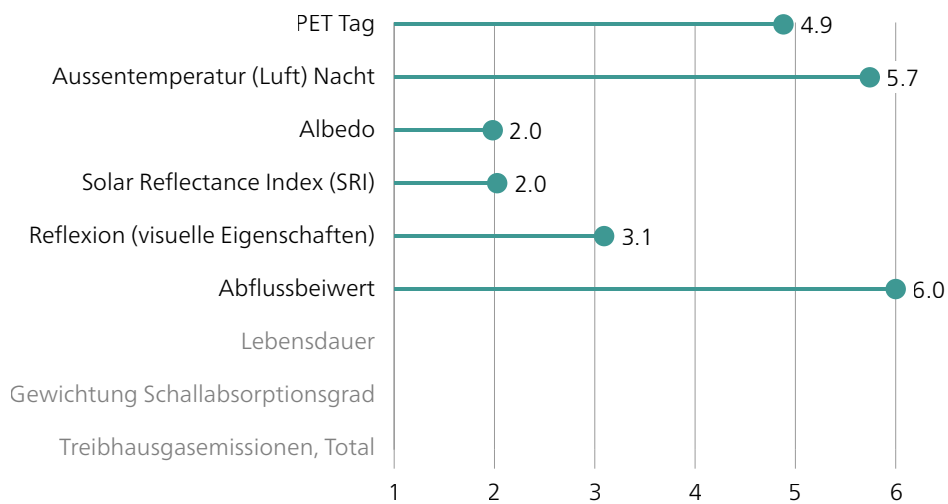
trocken



feucht

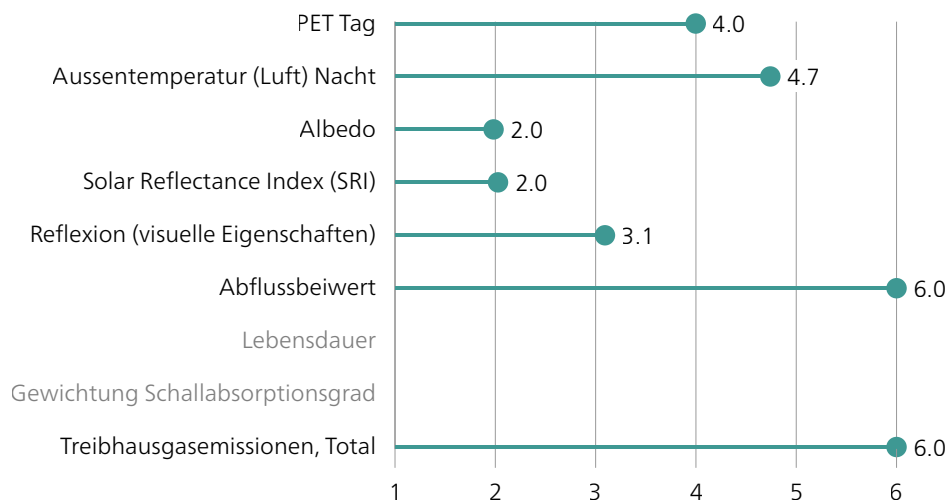


trocken, Bäume, Boden, org. Anteil

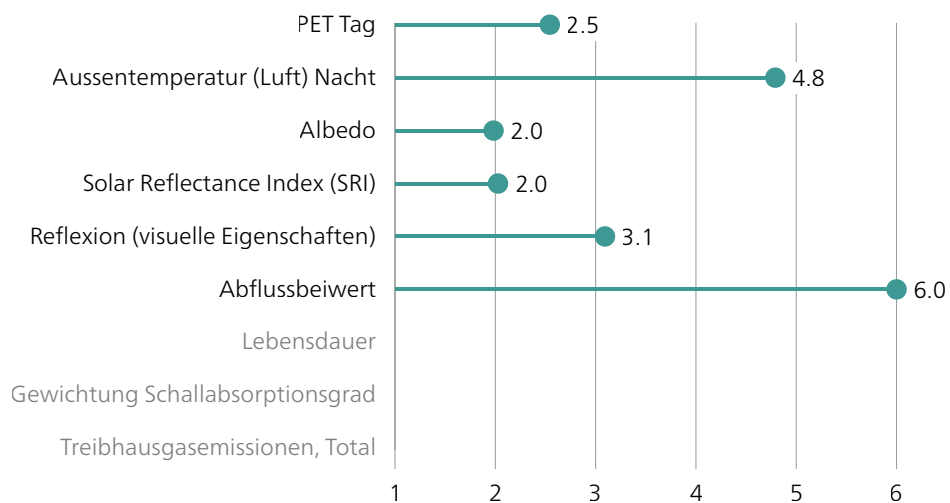


Bewertung

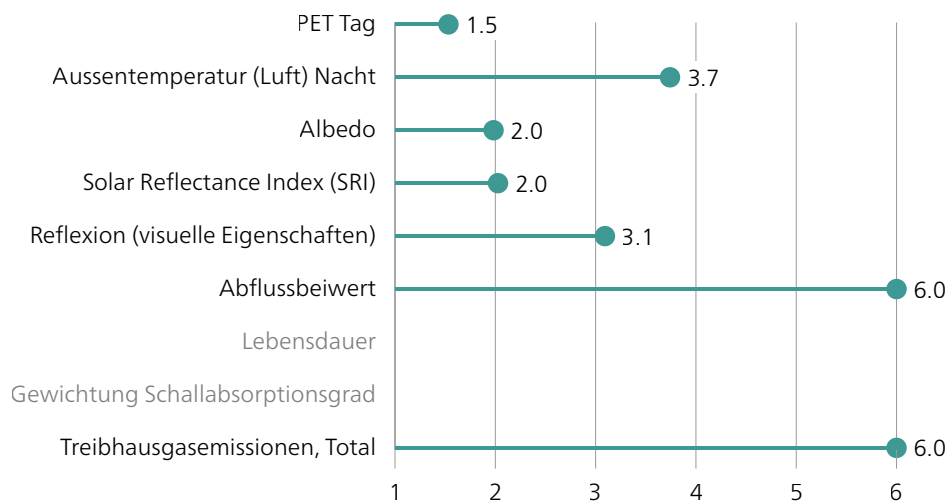
trocken, Bäume, Boden, min. Anteil



trocken, Boden, org. Anteil

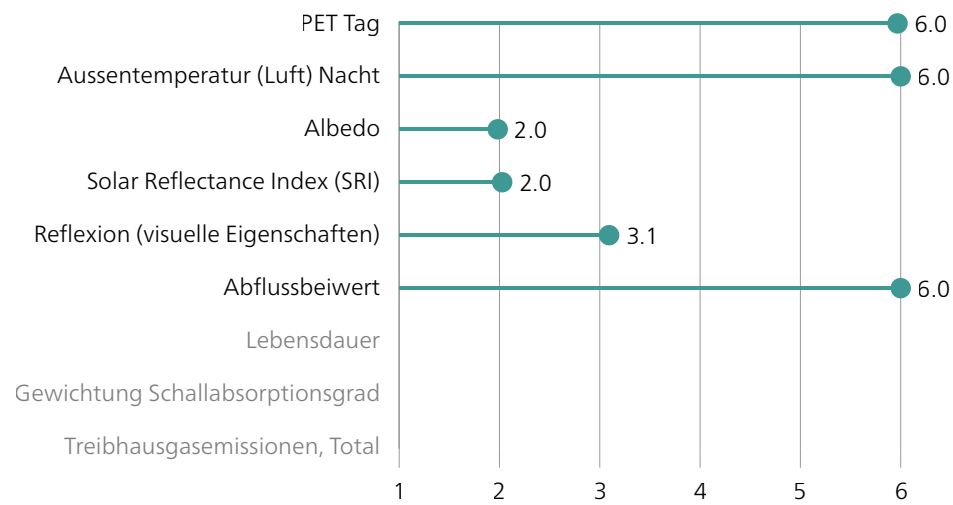


trocken, Boden, min. Anteil

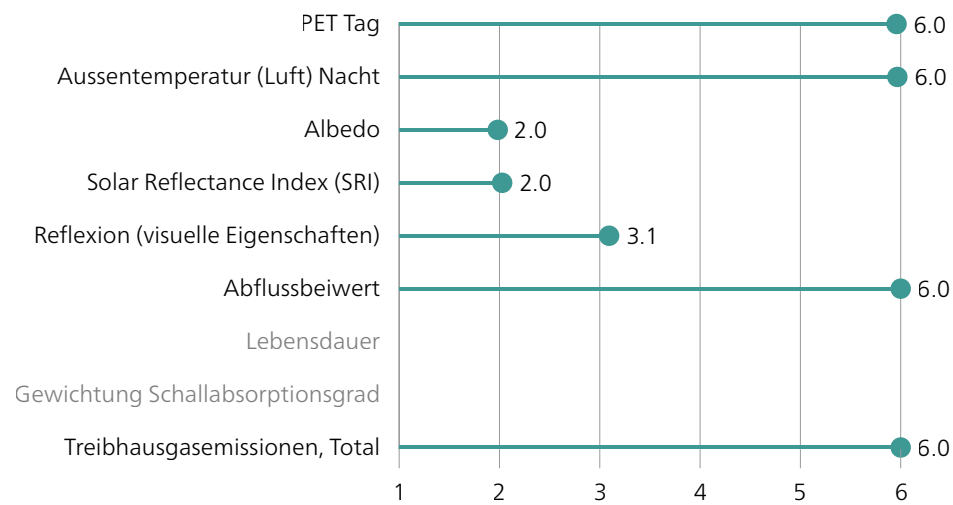


Bewertung

feucht, Bäume, Boden, org. Anteil

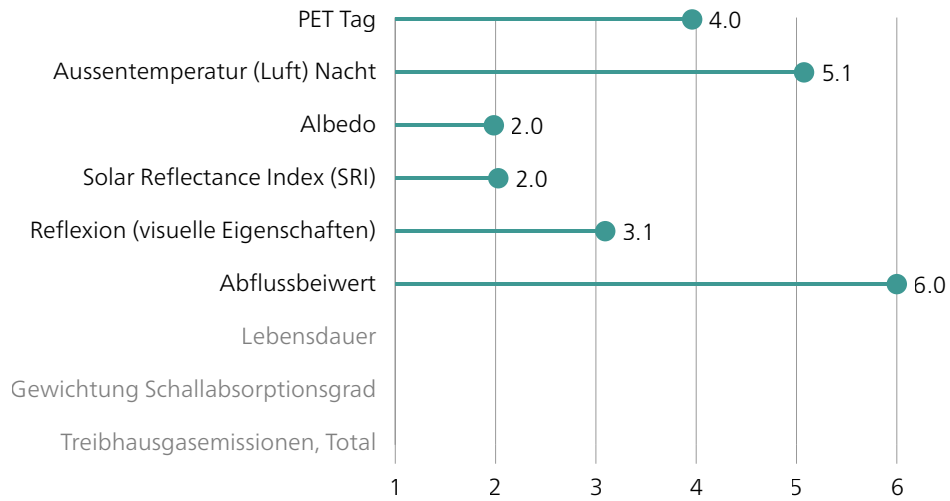


feucht, Bäume, Boden, min. Anteil

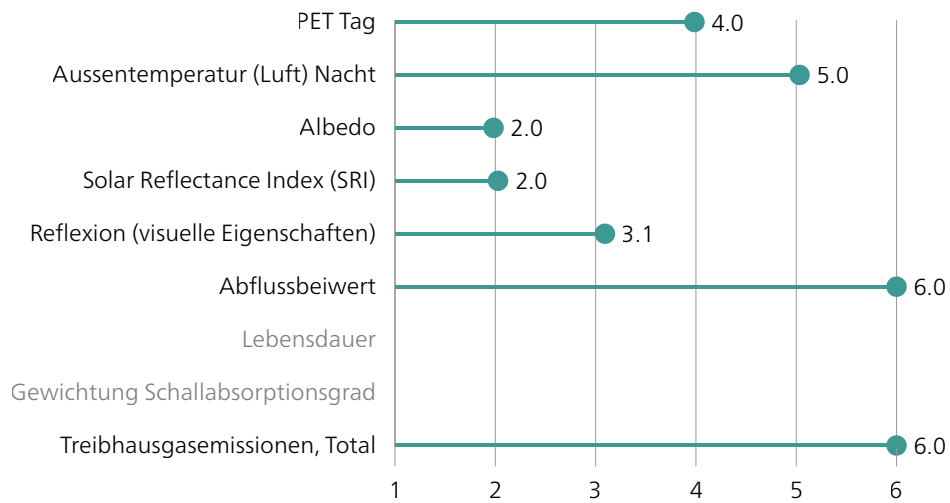


Bewertung

feucht, Boden, org. Anteil



feucht, Boden, min. Anteil

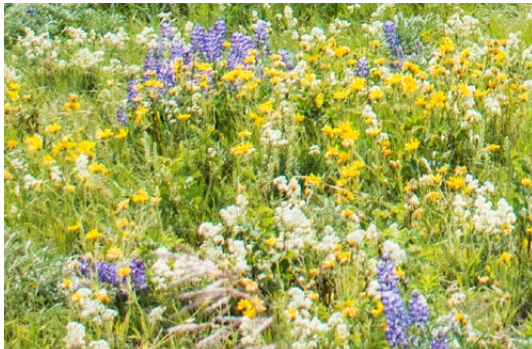


Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Rasen				
			trocken	feucht	trocken, Bäume, Boden org. Anteil	trocken, Bäume, Boden min. Anteil	trocken, Boden org. Anteil
			Kennwert	Kennwert	Kennwert	Kennwert	Kennwert
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'700	1'700	400	2'000	400
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.30	1.30	1.50	1.50	1.50
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'300	1'300	1'500	1'500	1'500
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.21	2.21	0.60	3.00	0.60
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
		λ (D)	2.40	2.40	0.20	2.40	0.20
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
		a (D)	1.1E-06	1.1E-06	3.3E-07	8.0E-07	3.3E-07
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	2'303				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	2.30				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.14				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.173				
Albedo	α	–	0.25				
Emissivität	ε	–	0.90				
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	25.0				
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.25				
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.				
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.				
Abflussbeiwert	Ψ	–	0.10				
Lebensdauer	a	–	n.a.				
Unterhalt			ja				
Nachrüstbarkeit			nein				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	n.a.				
f_m 250		–	n.a.				
f_m 500		–	n.a.				
f_m 1000		–	n.a.				
f_m 2000		–	n.a.				
f_m 4000		–	n.a.				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	19	19	n.a.	19	n.a.
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	4'896	4'896	#WERT!	4'896	#WERT!
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.00	0.00	n.a.	0.00	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	0.8	0.8	#WERT!	0.8	#WERT!
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.6	22.4	22.4	22.5	22.5
PET Tag	PET	°C	37.9	35.4	34.5	35.4	36.9

Anmerkungen: Für den natürlich vorhandenen Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil sind keine Daten zu Umweltbelastungspunkten und Treibhausgasemissionen vorhanden. Stattdessen werden die Werte für Split eingesetzt. Beim Boden mit erhöhtem organischem Anteil kann kein Ersatzwert angenommen werden, da die Zusammensetzung und der Anteil möglicher organischer Stoffe zu unterschiedlich sind. Der Abbau von Torf selber ist in der Schweiz verboten und das Torfausstiegskonzept des Bundes lehnt einen Import ab (siehe auch [«Infobox: Böden für Grünflächen»](#)).

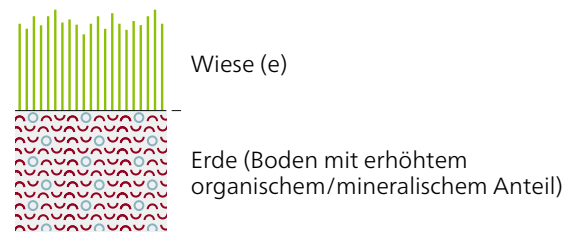
4.6.10 Wiese (B_Wiese)

Ansicht



Quelle: Sharissa Johnson auf Unsplash

Aufbau



Materialdaten

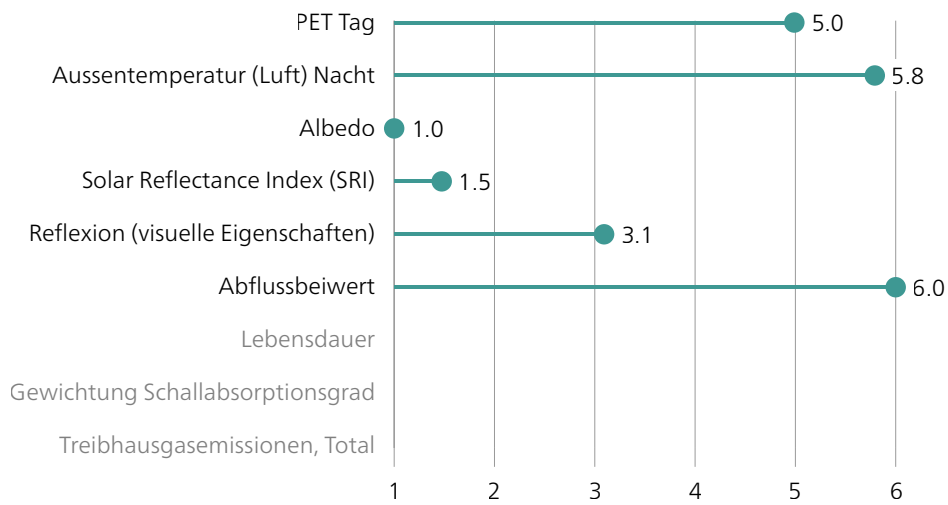
		trocken, Bäume, Boden, org. Anteil	trocken, Bäume, Boden, min. Anteil	trocken, Boden, org. Anteil	trocken, Boden, min. Anteil
PET Tag	°C	34.4	35.3	36.8	37.9
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.3	22.5	22.5	22.6
Albedo	–	0.2	0.2	0.2	0.2
Solar Reflectance Index (SRI)	–	18.0	18.0	18.0	18.0
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.3	0.3	0.3	0.3
Abflussbeiwert	–	0.1	0.1	0.1	0.1
Lebensdauer	a	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!	0.8	#WERT!	0.8

Kommentare: Für den natürlich vorhandenen Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil sind keine Daten zu Umweltbelastungspunkten und Treibhausgasemissionen vorhanden. Stattdessen werden die Werte für Split eingesetzt. Beim Boden mit erhöhtem organischem Anteil kann kein Ersatzwert angenommen werden, da die Zusammensetzung und der Anteil möglicher organischer Stoffe zu unterschiedlich sind. Der Abbau von Torf selber ist in der Schweiz verboten und das Torfausstiegskonzept des Bundes lehnt einen Import ab (siehe auch [«Infobox: Böden für Grünflächen»](#)).

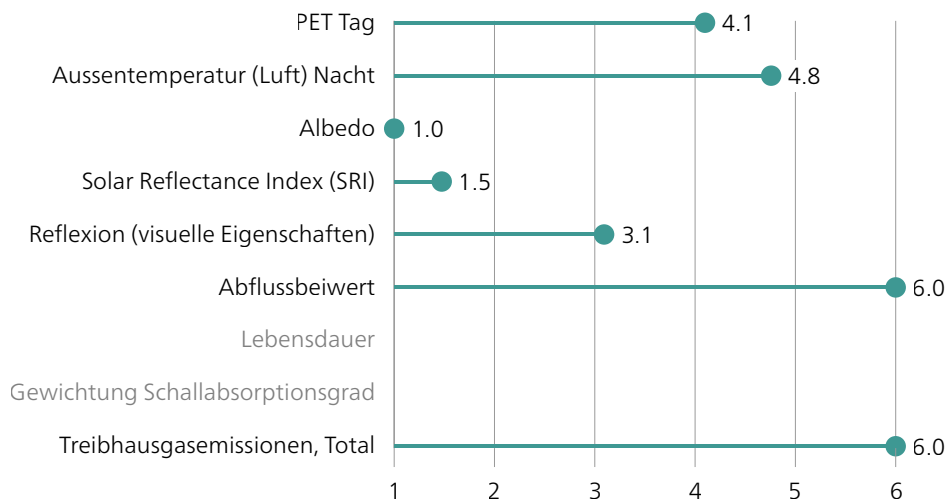
feucht, Bäume, Boden, org. Anteil	feucht, Bäume, Boden, min. Anteil	feucht, Boden, org. Anteil	feucht, Boden, min. Anteil
33.3	33.3	35.4	35.4
22.3	22.3	22.4	22.4
0.2	0.2	0.2	0.2
18.0	18.0	18.0	18.0
0.3	0.3	0.3	0.3
0.1	0.1	0.1	0.1
n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
#WERT!	0.8	#WERT!	0.8

Bewertung

trocken, Bäume, Boden, org. Anteil

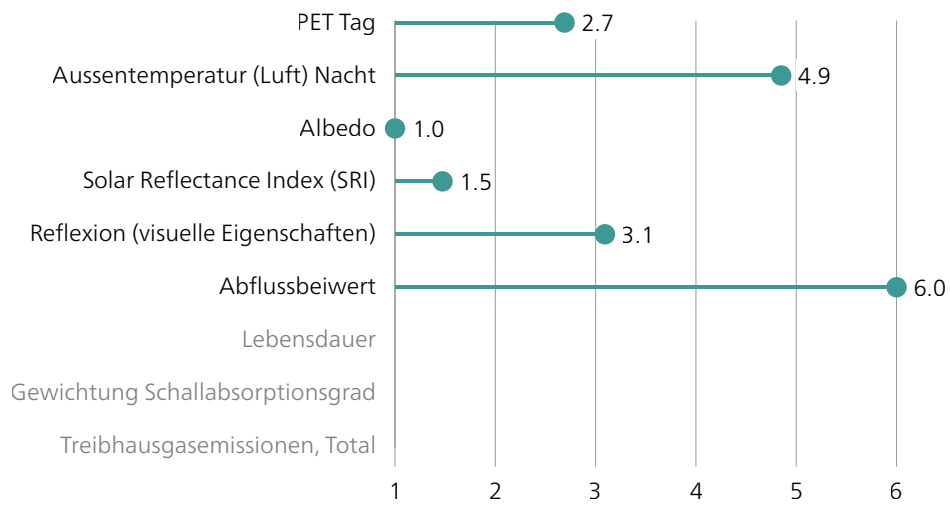


trocken, Bäume, Boden, min. Anteil

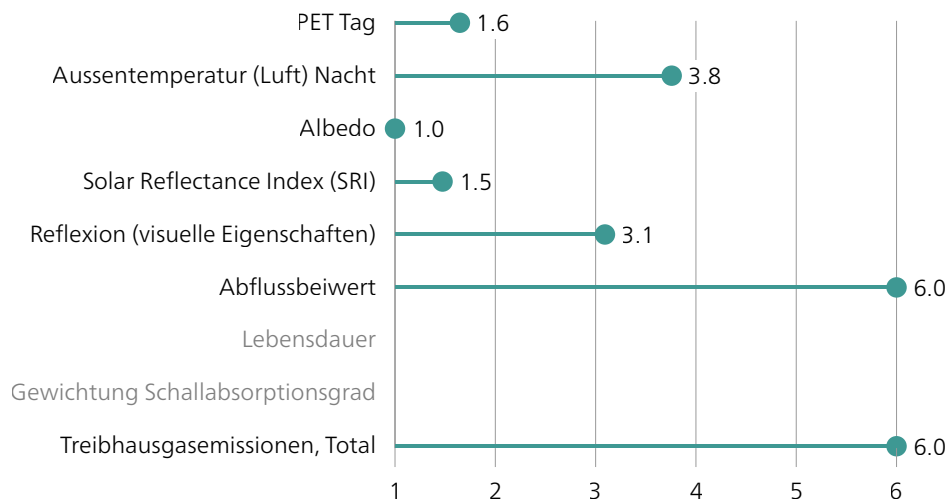


Bewertung

trocken, Boden, org. Anteil

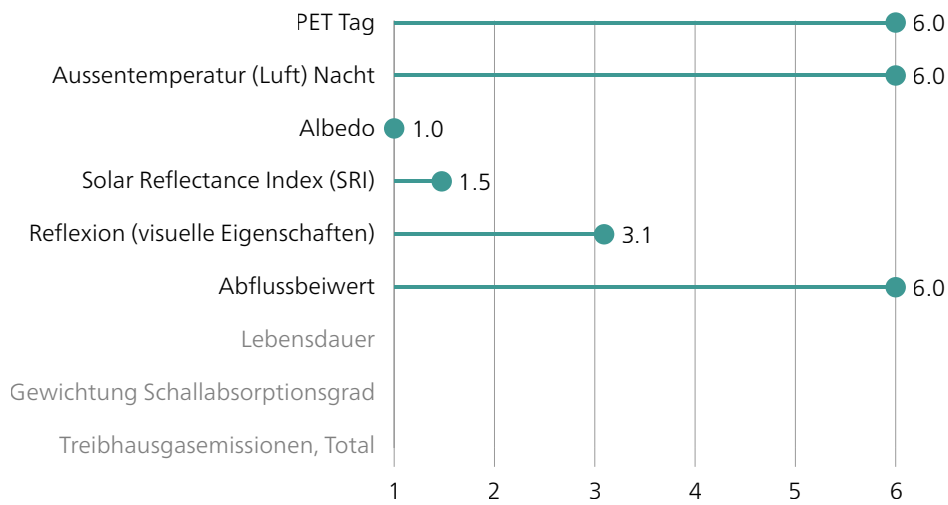


trocken, Boden, min. Anteil

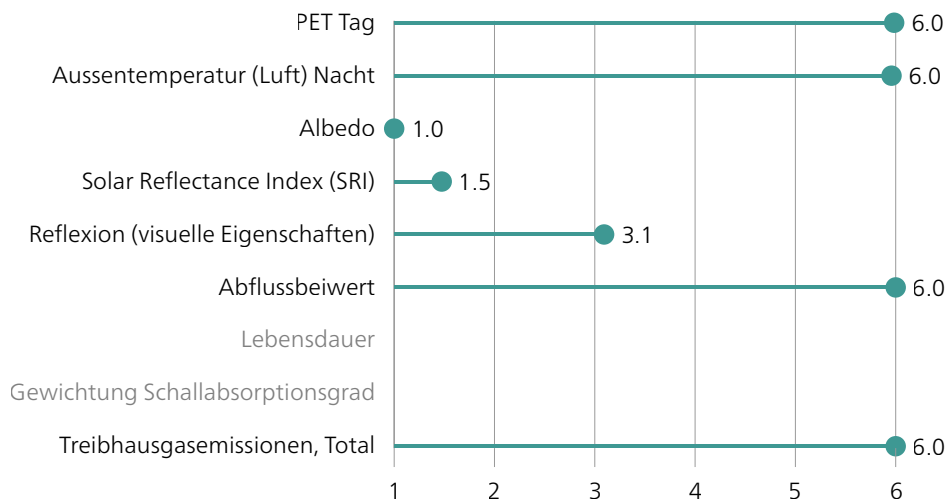


Bewertung

feucht, Bäume, Boden, org. Anteil

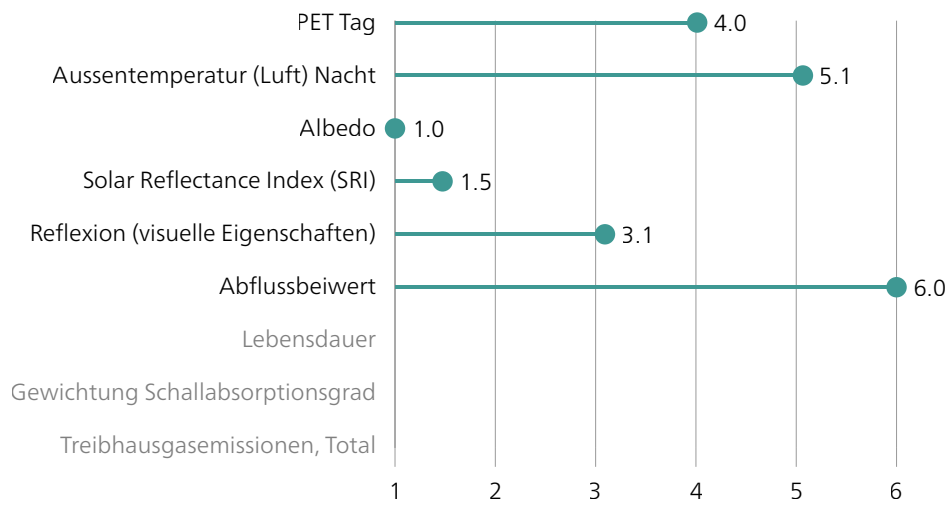


feucht, Bäume, Boden, min. Anteil

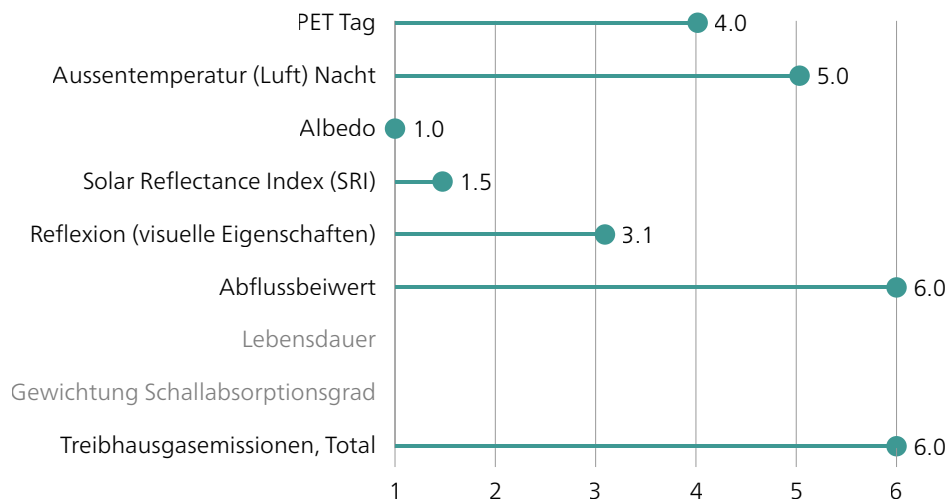


Bewertung

feucht, Boden, org. Anteil



feucht, Boden, min. Anteil



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Wiese				
			trocken, Bäume, Boden org. Anteil	trocken, Bäume, Boden min. Anteil	trocken, Boden org. Anteil	trocken, Boden min. Anteil	feucht, Bäume, Boden org. Anteil
			Kennwert	Kennwert	Kennwert	Kennwert	Kennwert
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	400	2'000	400	2'000	900
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.50	1.50	1.50	1.50	1.30
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1'500	1'500	1'500	1'500	1'300
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB) λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.60	3.00	0.60	3.00	1.17
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB) a (D)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$ m^2/s	0.20	2.40	0.20	2.40	0.50
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	3.3E-07	8.0E-07	3.3E-07	8.0E-07	4.3E-07
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$ $\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	346				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.35				
Albedo	α	–	0.02				
Emissivität	ε	–	0.096				
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	0.16				
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.98				
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$ $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	18.0				
Abflussbeiwert	Ψ	–	0.25				
Lebensdauer	a	–	n.a.				
Unterhalt			n.a.				
Nachrüstbarkeit			0.10				
Stromproduktion			n.a.				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–	ja				
f_m 125		–	nein				
f_m 250		–	nein				
f_m 500		–	n.a.				
f_m 1000		–	n.a.				
f_m 2000		–	n.a.				
f_m 4000		–	n.a.				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.	19	n.a.	19	n.a.
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!	4896	#WERT!	4896	#WERT!
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.	0.00	n.a.	0.00	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!	0.8	#WERT!	0.8	#WERT!
Aussentemperatur (Luft) Nacht	θ_a	°C	22.3	22.5	22.5	22.6	22.3
PET Tag	PET	°C	34.4	35.3	36.8	37.9	33.3

Anmerkungen: Für den natürlich vorhandenen Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil sind keine Daten zu Umweltbelastungspunkten und Treibhausgasemissionen vorhanden. Stattdessen werden die Werte für Split eingesetzt. Beim Boden mit erhöhtem organischem Anteil kann kein Ersatzwert angenommen werden, da die Zusammensetzung und der Anteil möglicher organischer Stoffe zu unterschiedlich sind. Der Abbau von Torf selber ist in der Schweiz verboten und das Torfausstiegskonzept des Bundes lehnt einen Import ab (siehe auch [«Infobox: Böden für Grünflächen»](#)).

Literatur:
KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009 / 1:2022* (V6.2). Schweiz, 2022.
R. Levinson, *SRI-calc 10*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.
T. R. Oke, M. Gerald, A. Christen, and J. A. Voogt, *Urban Climates*, 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
SN 592000:2012, *Anlagen für die Liegenschaftsentwässerung – Planung und Ausführung*, 2012, pp. 1–204.
W. Witting, *Licht. Sehen. Gestalten*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag, 2014.
C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

4.7 Dächer

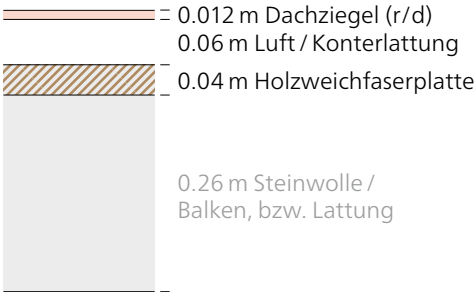
4.7.1 Dachkonstruktion belüftet mit Ziegeldeckung (D_Ziegel)

Ansicht



Quelle: D. Cashbaugh auf Unsplash

Aufbau



Farbvarianten



rot

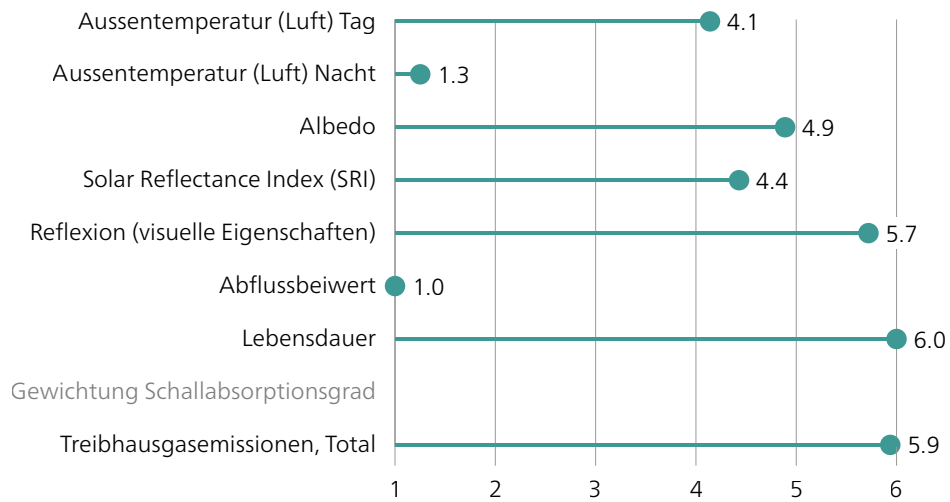


dunkel

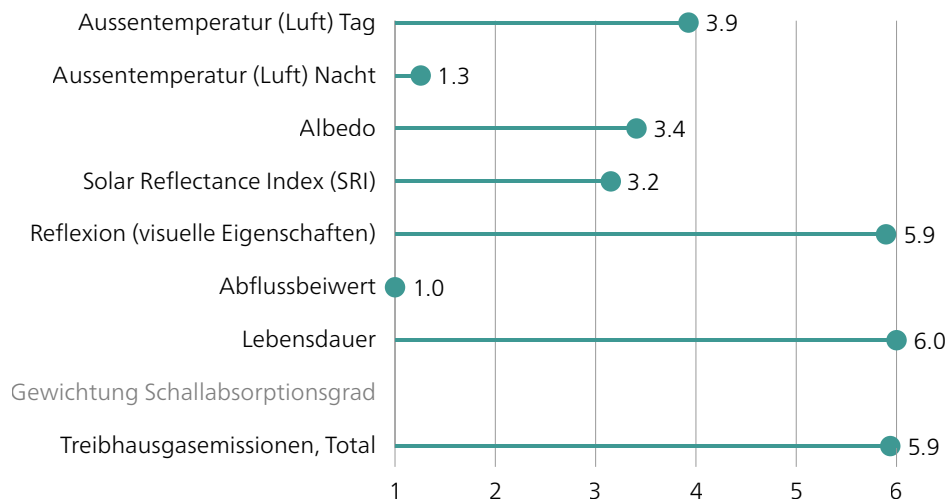
Materialdaten		Standard (rot)	dunkel
Aussentemperatur (Luft) Tag	°C	33.8	33.8
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.4	22.4
Albedo	–	0.60	0.40
Solar Reflectance Index (SRI)	–	59.0	37.0
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.13	0.10
Abflussbeiwert	–	1.00	1.00
Lebensdauer	a	50	50
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	9.2	9.2

Bewertung

Ziegel, rot



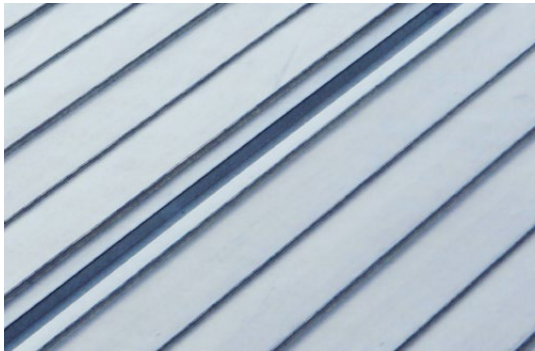
Ziegel, dunkel



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			
			Ziegel			
			rot	dunkel		
			Kennwert	Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'000		0.012	24.00
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.80			
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	800			
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.60			
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$				
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.00			
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$				
	a (D)	m^2/s	6.3E-07			
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'265			
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.26			
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.08			
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.131			
Albedo	α	–	0.60	0.40		
Emissivität	ϵ	–	0.90	0.95		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	59.0	37.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.13	0.10		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.			
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	2.50			
Abflussbeiwert	ψ	–	1.0			
Lebensdauer	a	–	50			
Unterhalt			nein			
Nachrüstbarkeit			ja			
Stromproduktion			nein			
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–				
f_m 125		–	n.a.			
f_m 250		–	n.a.			
f_m 500		–	n.a.			
f_m 1000		–	n.a.			
f_m 2000		–	n.a.			
f_m 4000		–	n.a.			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	514			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	12'336			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.39			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	9			
Aussentemperatur (Luft) Nacht, 21.6 m	θ_a	°C	22.4	22.4		
Aussentemperatur (Luft) Tag, 21.6 m	θ_a	°C	33.8	33.8		

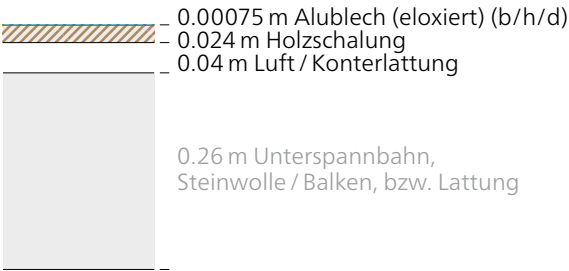
4.7.2 Dachkonstruktion belüftet mit Metalldeckung (D_Metall)

Ansicht



Quelle: Boris Misevic auf Unsplash

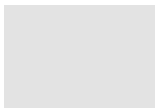
Aufbau



Farbvarianten



Metall



hell

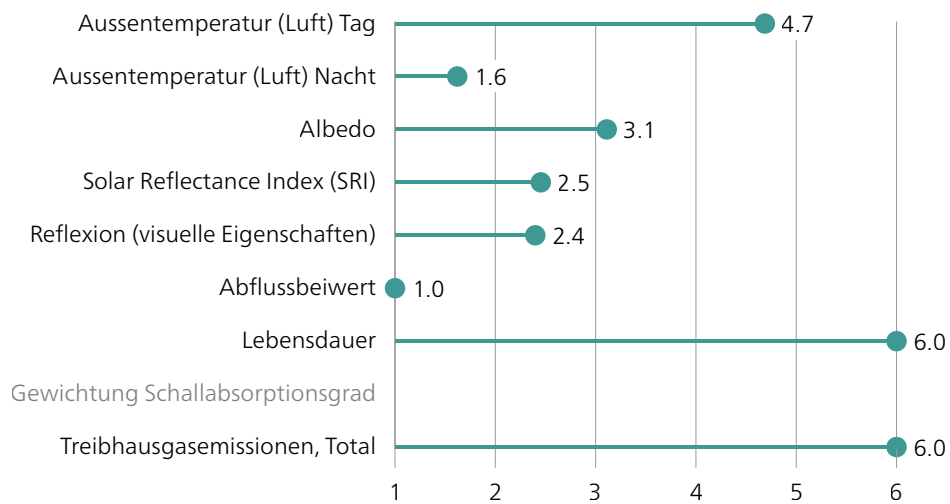


dunkel

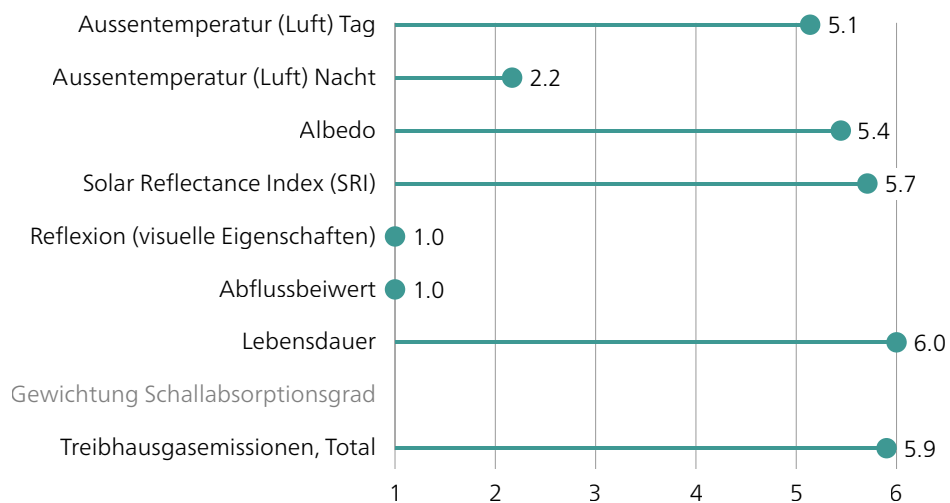
Materialdaten		Alublech (eloxiert)	A. weiss	A. dunkelgrau
Aussentemperatur (Luft) Tag	°C	33.7	33.6	33.7
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.3	22.3	22.4
Albedo	–	0.36	0.68	0.08
Solar Reflectance Index (SRI)	–	25	81	0
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.60	0.80	0.10
Abflussbeiwert	–	1.00	1.00	1.00
Lebensdauer	a	50	50	50
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.	n.a.	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	6.0	5.9	5.9

Bewertung

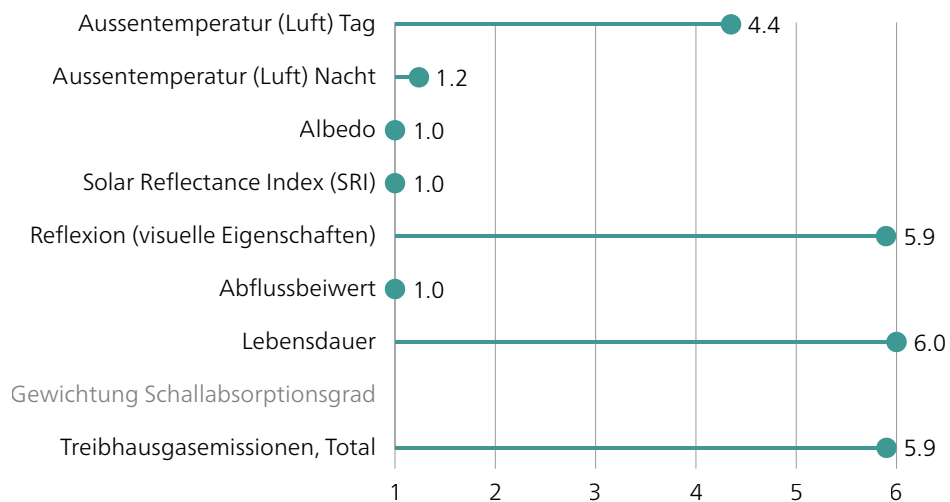
Alublech (eloxiert)



Alublech, hell



Alublech, dunkelgrau



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien				
			Alublech (eloxiert)	hell	dunkelgrau		
			Kennwert	Kennwert	Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'700			0.0008	2.03
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.88 880				
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.38				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB) λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	160				
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB) a (D)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$ m^2/s	6.7E-05				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	19498				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$ $\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	19.50 1.17				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	1.361				
Albedo	α	–	0.36	0.68	0.075		
Emissivität	ϵ	–	0.58	0.85	0.85		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	25.0	81.0	0.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.60	0.80	0.10		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$ $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	0.00 0.00				
Abflussbeiwert	ψ	–	1.0				
Lebensdauer	a	–	50				
Unterhalt			nein				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			nein				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	n.a.				
f_m 250		–	n.a.				
f_m 500		–	n.a.				
f_m 1000		–	n.a.				
f_m 2000		–	n.a.				
f_m 4000		–	n.a.				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	12'700	6'260	6'260		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	25'718	31'978	31'978		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	2.67	3.64	3.64		
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	5	9	9		
Aussentemperatur (Luft) Nacht, 21.6 m	θ_a	°C	22.3	22.3	22.4		
Aussentemperatur (Luft) Tag, 21.6 m	θ_a	°C	33.7	33.6	33.7		

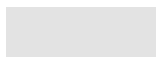
4.7.3 Dachkonstruktion belüftet mit Faserzementdeckung (D_Faserzement)

Ansicht



Quelle: www.cedral.world.de

Farbvarianten



hell

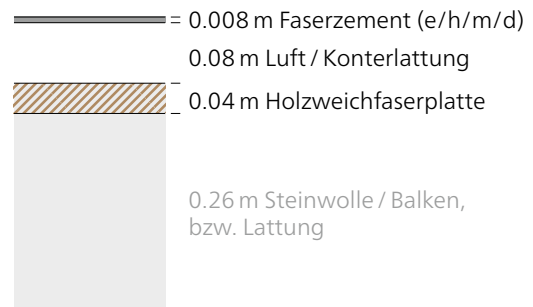


mittel



dunkel

Aufbau

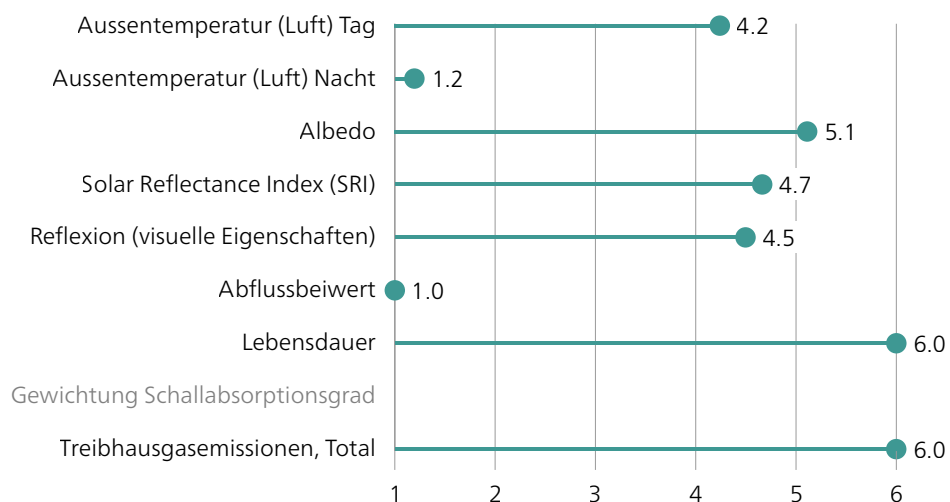


Materialdaten

		Faserzement	F. hell	F. mittel	F. dunkel
Aussentemperatur (Luft) Tag	°C	33.8	33.7	33.8	33.8
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.4	22.4	22.4	22.4
Albedo	–	0.63	0.75	0.45	0.26
Solar Reflectance Index (SRI)	–	63	86	53	35
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.30	0.70	0.50	0.25
Abflussbeiwert	–	1.00	1.00	1.00	1.00
Lebensdauer	a	50	50	50	50
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	7.0	7.0	7.0	7.0

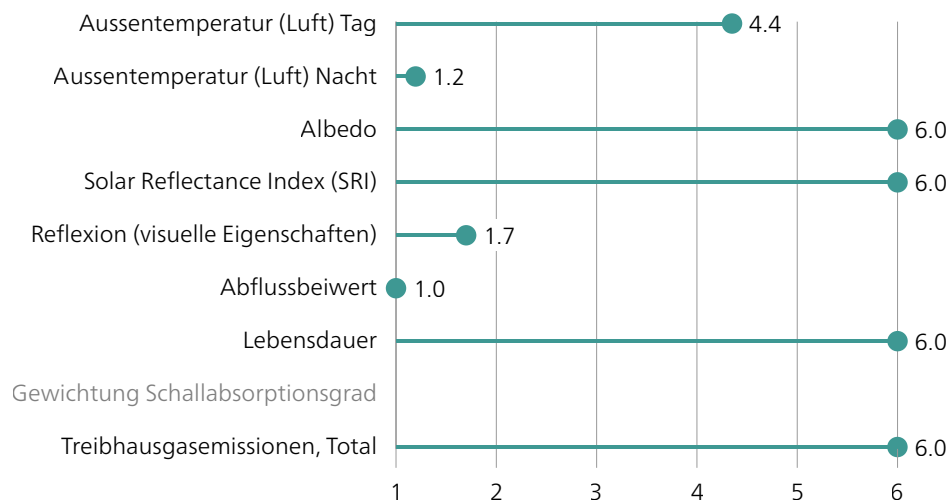
Bewertung

Faserzement

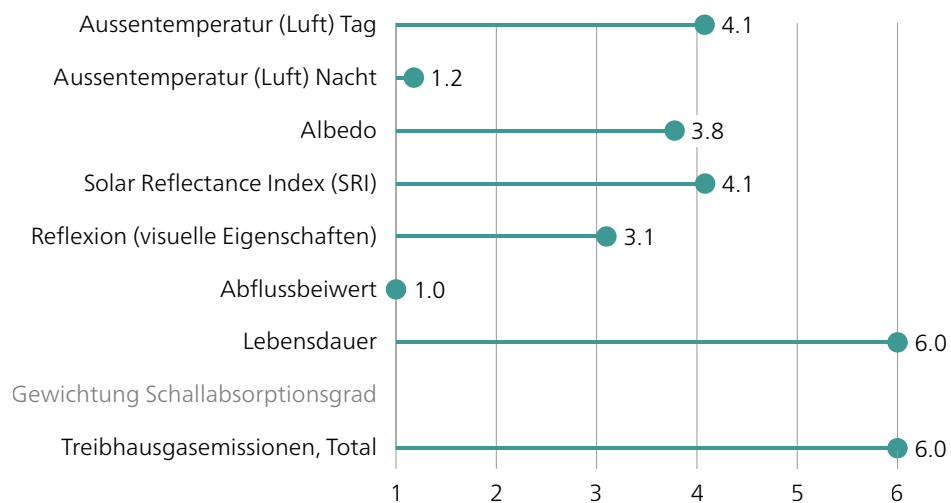


Bewertung

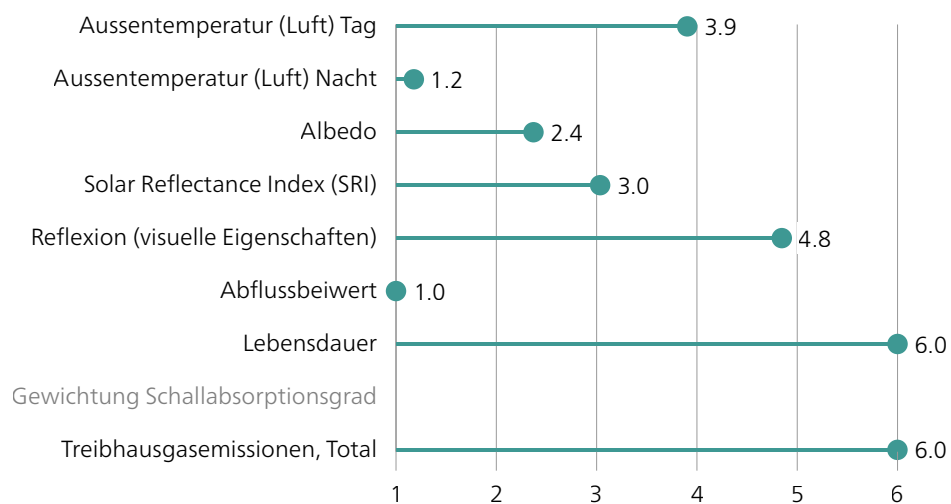
Faserzement, hell



Faserzement, mittel



Faserzement, dunkel



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			
			Faserzement			
			Kennwert	hell	mittel	dunkel
			Kennwert	Kennwert	Kennwert	Kennwert
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'000			
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.10			
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'100			
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.20			
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$				
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.48			
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$				
	a (D)	m^2/s	2.2E-07			
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1'028			
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.03			
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.06			
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.077			
Albedo	α	–	0.63	0.75	0.45	0.26
Emissivität	ϵ	–	0.90	0.85	0.90	0.95
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	63.0	86.0	53.0	35.0
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.30	0.70	0.50	0.25
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	5.00			
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.			
Abflussbeiwert	ψ	–	1.0			
Lebensdauer	a	–	50			
Unterhalt			nein			
Nachrüstbarkeit			ja			
Stromproduktion			nein			
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–				
f_m 125		–	n.a.			
f_m 250		–	n.a.			
f_m 500		–	n.a.			
f_m 1000		–	n.a.			
f_m 2000		–	n.a.			
f_m 4000		–	n.a.			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	1'100			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	11'000			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.70			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	7			
Aussentemperatur (Luft) Nacht, 21.6 m θ_a		°C	22.4	22.4	22.4	22.4
Aussentemperatur (Luft) Tag, 21.6 m θ_a		°C	33.8	33.7	33.8	33.8

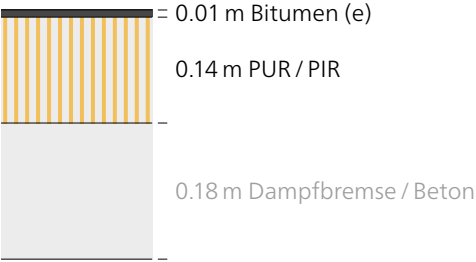
4.7.4 Dachkonstruktion ohne Schutz- und Nutzschichten (D_Bitumen)

Ansicht



Quelle: Hans Holub GmbH

Aufbau

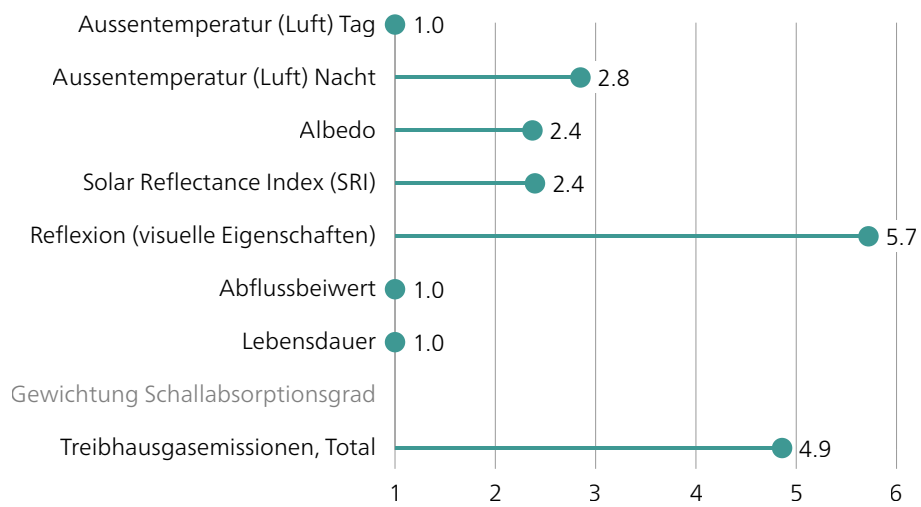


Materialdaten		Bitumen
Aussentemperatur (Luft) Tag	°C	34.2
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.2
Albedo	–	0.26
Solar Reflectance Index (SRI)	–	24
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.13
Abflussbeiwert	–	1.00
Lebensdauer	a	20
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	48.7

Kommentare: Nacktdächer sind in einigen Kantonen verboten.
 Aus ökologischen Gründen ist dem häufig verwendeten Bitumen eine TPO-Abdichtung (TPO = thermoplastischer Polyolefine) vorzuziehen.

Bewertung

Bitumen



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien		
			Bitumen	PUR/PIR	
			Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'000	0.009	8.80
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.00		
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'000		1'400
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.00		
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$			
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.17		0.025
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$			
	a (D)	m^2/s	1.7E-07		
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	412		
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.41		
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.02		
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.068		
Albedo	α	–	0.26		
Emissivität	ϵ	–	0.92		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	24.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.13		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.		
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	0.00		
Abflussbeiwert	Ψ	–	1.0		
Lebensdauer	a	–	20		
Unterhalt			nein		
Nachrüstbarkeit			ja		
Stromproduktion			nein		
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–			
f_m 125		–	n.a.		
f_m 250		–	n.a.		
f_m 500		–	n.a.		
f_m 1000		–	n.a.		
f_m 2000		–	n.a.		
f_m 4000		–	n.a.		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	2'964		10'400
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	26'083		43'680
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	1.99		7.44
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	17		31
Aussentemperatur (Luft) Nacht, 21.6 m	θ_a	°C	22.2		
Aussentemperatur (Luft) Tag, 21.6 m	θ_a	°C	34.2		

Anmerkungen: Nacktdächer sind in einigen Kantonen verboten. Aus ökologischen Gründen ist dem häufig verwendeten Bitumen eine TPO-Abdichtung (TPO = thermoplastischer Polyolefine) vorzuziehen.

		Gesamt	Literatur	
(m)	spez. KW	spez. KW	Bitumen	PUR/PIR
0.14	4.20		Zürcher	Swisspor, PIR Vlies
			Zürcher	Zürcher
			Zürcher	Swisspor, PIR Vlies
			Rawat	
			Rawat	
			Rawat	
			Hentschel	
			Hauser	
			SN 592000:2012	
			BNB	BNB
			KBOB	KBOB
		69'763		
			KBOB	KBOB
		49		

Literatur:

BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen 2017*, Berlin, 2017.

G. Hauser, *Bauphysikalische Grundlagen Feuchtelehre – Vorlesungsskript Bauphysik I und II*, Kassel, 2003

H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung*, 5th ed. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2002.

KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022* (V6.2). Schweiz, 2022.

M. Rawat, R. Singh, *A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions, Energy and Built Environm.*, vol. 3, pp. 327–347, 2022

SN 592000:2012, *Anlagen für die Liegenschaftsentwässerung – Planung und Ausführung*, 2012, pp. 1–204.

C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

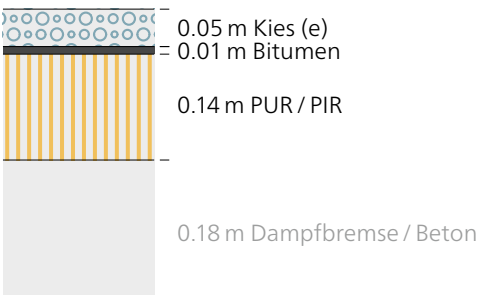
4.7.5 Dachkonstruktion bekiest (D_Kies)

Ansicht



Quelle: www.meyerkieswerk.ch

Aufbau

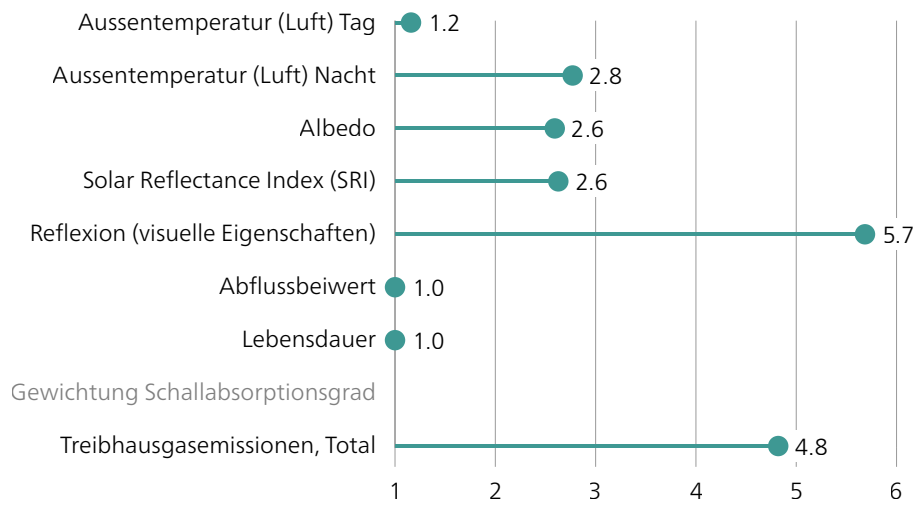


Materialdaten		Kies
Aussentemperatur (Luft) Tag	°C	34.2
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.2
Albedo	–	0.29
Solar Reflectance Index (SRI)	–	28
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.13
Abflussbeiwert	–	1.00
Lebensdauer	a	20
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	50.1

Kommentare: Aus ökologischen Gründen ist dem häufig verwendeten Bitumen eine TPO-Abdichtung (TPO = thermoplastischer Polyolefine) vorzuziehen.

Bewertung

Kies



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien		
			Kies	Bitumen	
			Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'800	0.05	90.00
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.71		
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	710		
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.28		
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$			
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.70		0.17
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$			
	a (D)	m^2/s	5.5E-07		
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	946		
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.95		
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.06		
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.123		
Albedo	α	–	0.29		
Emissivität	ε	–	0.90		
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	28.0		
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.13		
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.		
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.		
Abflussbeiwert	Ψ	–	1.00		
Lebensdauer	a	–	20		
Unterhalt			nein		
Nachrüstbarkeit			ja		
Stromproduktion			nein		
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–			
f_m 125		–	n.a.		
f_m 250		–	n.a.		
f_m 500		–	n.a.		
f_m 1000		–	n.a.		
f_m 2000		–	n.a.		
f_m 4000		–	n.a.		
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	59		2'964
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	5'346		26'083
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	0.02		1.986
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	1		17
Aussentemperatur (Luft) Nacht, 21.6 m	θ_a	°C	22.2		
Aussentemperatur (Luft) Tag, 21.6 m	θ_a	°C	34.2		

Anmerkungen: Aus ökologischen Gründen ist dem häufig verwendeten Bitumen eine TPO-Abdichtung (TPO = thermoplastischer Polyolefine) vorzuziehen.

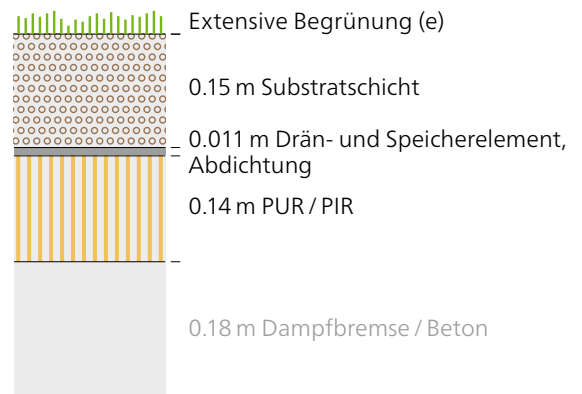
4.7.6 Dachkonstruktion mit Extensivbegrünung (D_Extensiv_Begrünung)

Ansicht



Quelle: www.wickidach.ch

Aufbau



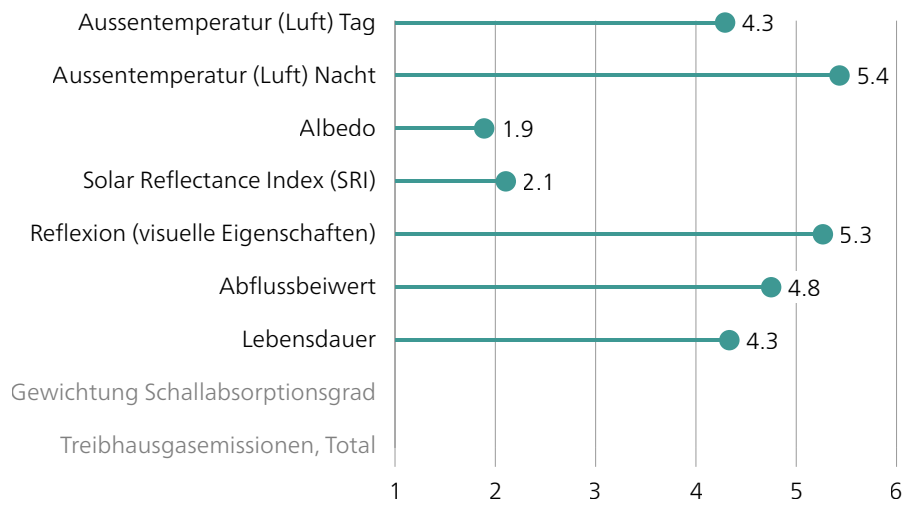
Materialdaten

		Grün und Substrat- schicht trocken	Grün und Substrat- schicht feucht
Ausstemperatur (Luft) Tag	°C	33.7	33.5
Ausstemperatur (Luft) Nacht	°C	21.8	21.8
Albedo	–	0.20	0.20
Solar Reflectance Index (SRI)	–	19	19
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.19	0.19
Abflussbeiwert	–	0.40	0.40
Lebensdauer	a	40	40
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!	#WERT!

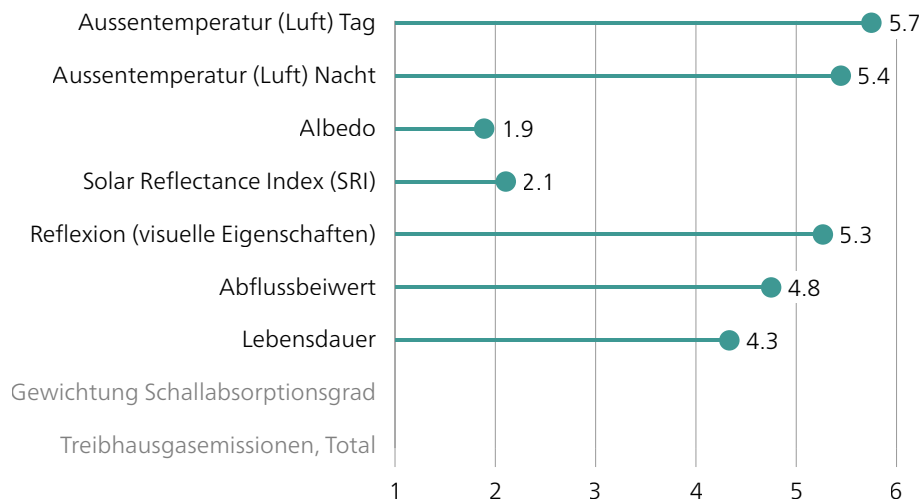
Kommentare: Es werden seitens der Kantone z.T. Mindestschichtdicken für das Substrat verlangt und regionale Ansaaten vorgeschrieben. Brandschutzrichtlinien sind einzuhalten.

Bewertung

Grün und Substratschicht, trocken



Grün und Substratschicht, feucht



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			
			Grün und Substrat-schicht trocken	Grün und Substrat-schicht feucht	(m)	spez. KW
			Kennwert	Kennwert		
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'040		0.15	156.00
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.71			
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'000			
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.04			
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$				
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.78			
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$				
	a (D)	m^2/s	7.5E-07			
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	900			
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.90			
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.05			
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.143			
Albedo	α	–	0.20			
Emissivität	ϵ	–	0.90			
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	19.00			
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.19			
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.			
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.			
Abflussbeiwert	Ψ	–	0.40			
Lebensdauer	a	–	40			
Unterhalt			ja			
Nachrüstbarkeit			nein			
Stromproduktion			nein			
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–				
f_m 125		–	n.a.			
f_m 250		–	n.a.			
f_m 500		–	n.a.			
f_m 1000		–	n.a.			
f_m 2000		–	n.a.			
f_m 4000		–	n.a.			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!			
Aussentemperatur (Luft) Nacht, 21.6 m	θ_a	°C	21.8	21.8		
PET Tag, 21.6 m	PET	°C	36.7	36.5		
Aussentemperatur (Luft) Tag, 21.6 m	θ_a	°C	33.7	33.5		

Anmerkungen: Es werden seitens der Kantone z.T. Mindestdickendicken für das Substrat verlangt und regionale Ansaaten vorgeschrieben. Brandschutzrichtlinien sind einzuhalten.

Literatur:

BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen* 2017, Berlin, 2017.

KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 (V6.2)*. Schweiz, 2022.

R. Levinson, *SRI-calc10*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.

J. MacIvor and J. Lundholm, *Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate*, Ecological Engineering, vol. 3, pp. 407–417, 2011.

[illegible]

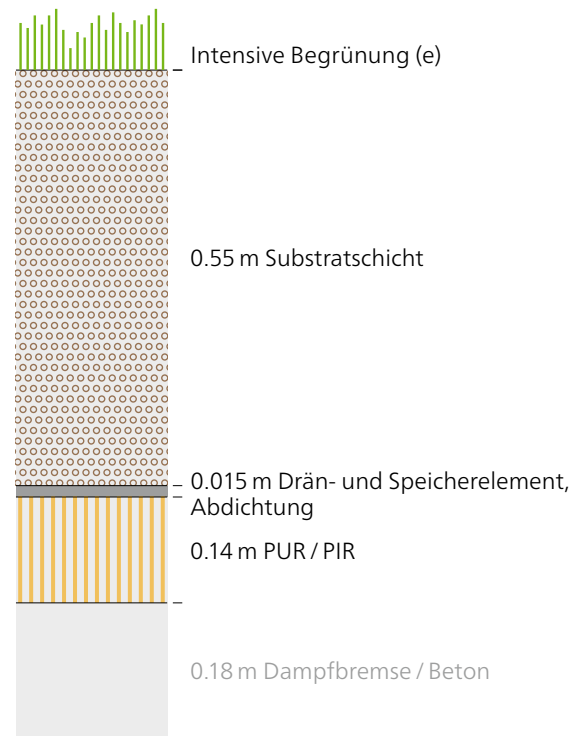
4.7.7 Dachkonstruktion mit Intensivbegrünung (D_Intensiv_Begrünung)

Ansicht



Quelle: www.gebaeudegruen.info

Aufbau



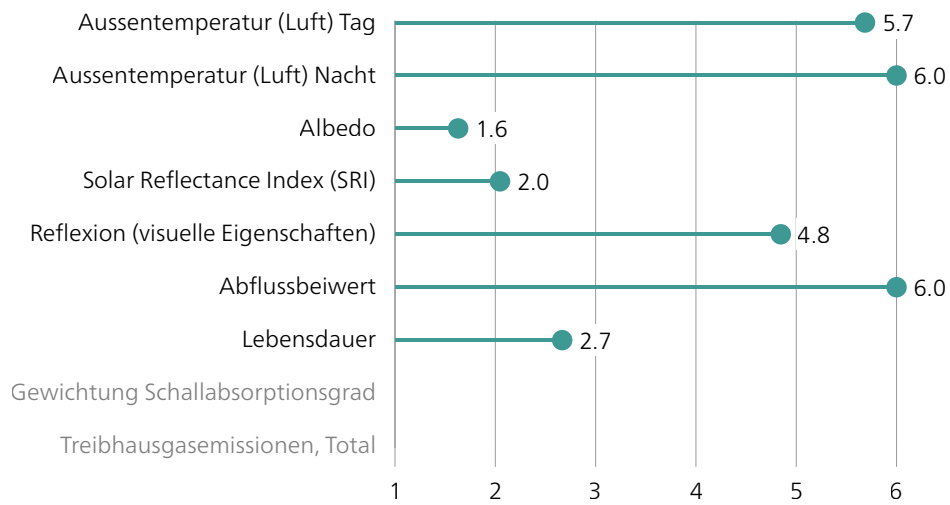
Materialdaten

		Grün und Substrat- schicht trocken	Grün und Substrat- schicht feucht
Aussentemperatur (Luft) Tag	°C	33.6	33.5
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	21.7	21.7
Albedo	–	0.16	0.16
Solar Reflectance Index (SRI)	–	18	18
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.25	0.25
Abflussbeiwert	–	0.20	0.20
Lebensdauer	a	30	30
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!	#WERT!

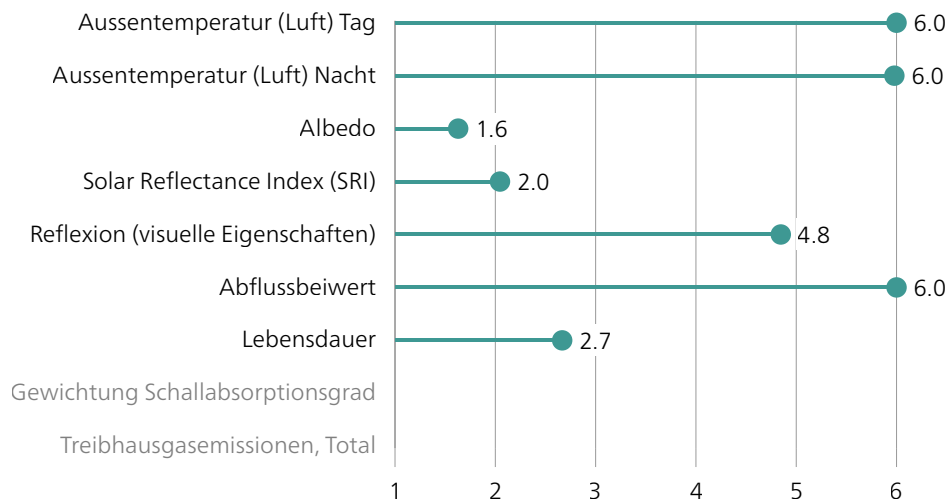
Kommentare: Es werden seitens der Kantone z.T. regionale Ansaaten vorgeschrieben.
Brandschutzrichtlinien sind einzuhalten.

Bewertung

Grün und Substratschicht, trocken



Grün und Substratschicht, feucht



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			
			Grün und Substrat-schicht trocken	Grün und Substrat-schicht feucht		
				Kennwert	(m)	spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	1'135		0.55	624.25
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.71			
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'000			
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1.14			
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$				
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.79			
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$				
	a (D)	m^2/s	7.0E-07			
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	948			
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.95			
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.06			
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.138			
Albedo	α	–	0.16			
Emissivität	ϵ	–	0.98			
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	18.0			
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.25			
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	n.a.			
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.			
Abflussbeiwert	ψ	–	0.20			
Lebensdauer	a	–	30			
Unterhalt			ja			
Nachrüstbarkeit			ja			
Stromproduktion			nein			
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–				
f_m 125		–	n.a.			
f_m 250		–	n.a.			
f_m 500		–	n.a.			
f_m 1000		–	n.a.			
f_m 2000		–	n.a.			
f_m 4000		–	n.a.			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.			
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.			
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!			
Aussentemperatur (Luft) Nacht, 21.6 m	θ_a	°C	21.7	21.7		
PET Tag, 21.6 m	PET	°C	36.6	36.6		
Aussentemperatur (Luft) Tag, 21.6 m	θ_a	°C	33.6	33.5		

Anmerkungen: Es werden seitens der Kantone z.T. regionale Ansaaten vorgeschrieben.
Brandschutzrichtlinien sind einzuhalten.

Literatur:

- BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen 2017*, Berlin, 2017.
KBOB / eco-bau / IPB, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 (V6.2)*. Schweiz, 2022.
R. Levinson, *SRI-calc10*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.
E. Nikles, B. Knobel, Y. Reisner, *Flachdachbegrünung: Flachdächer richtig begrünen – das ökologische Potenzial nutzen*, Basel: Stadtgärtnerei Basel, 2020.

T. R. Oke, M. Gerald, A. Christen, and J. A. Voogt, *Urban Climates*, 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
K. Schild and W. M. Willems, *Wärmeschutz*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
SN 592000:2012, *Anlagen für die Liegenschaftsentwässerung – Planung und Ausführung*, 2012, pp. 1–204.
W. Witting, *Licht. Sehen. Gestalten*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag, 2014.
C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.

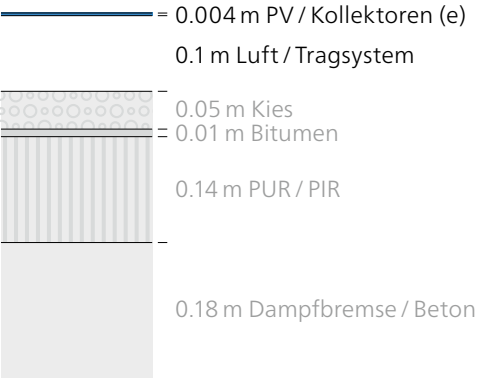
4.7.8 Dachkonstruktion vollflächig mit PV/Kollektoren (D_Photovoltaik)

Ansicht



Quelle: Hosaren auf Unsplash

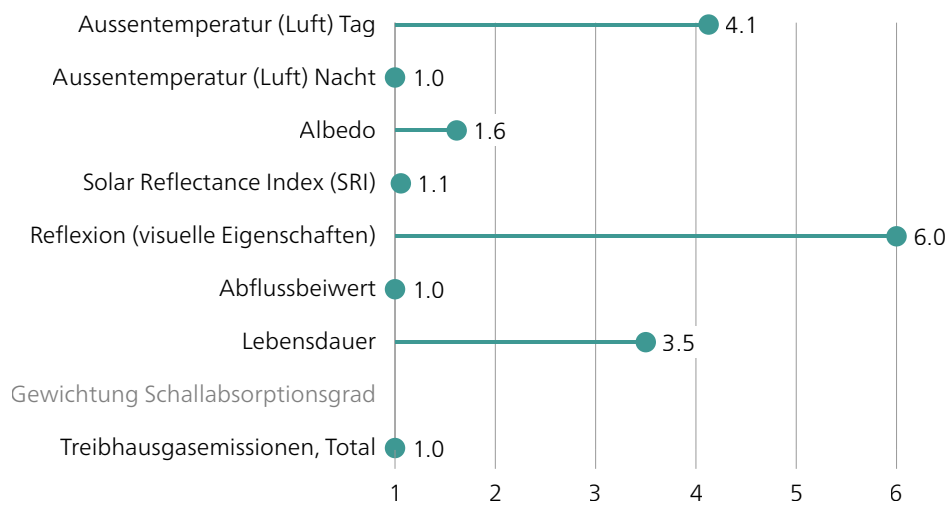
Aufbau



Materialdaten		PV/Glas
Aussentemperatur (Luft) Tag	°C	33.8
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.4
Albedo	–	0.16
Solar Reflectance Index (SRI)	–	1
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.09
Abflussbeiwert	–	1.00
Lebensdauer	a	35
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	190.0

Bewertung

PV/Glas



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien			Luft	
			PV / Glas				
			Kennwert	(m)	spez. KW	Kennwert	(m)
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}	2'500	0.004	10.00	1.23	0.10
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.00				
		$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1'000			1'008	
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	2.50				
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$					
	λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.00			0.025	
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$					
	a (D)	m^2/s	4.0E-07				
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1581				
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	1.58				
		$\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	0.09				
Eindringtiefe, 24 h	δ	m	0.105				
Albedo	α	–	0.16				
Emissivität	ϵ	–	0.83				
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	1.0				
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.09				
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$	0.00				
		$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	0.00				
Abflussbeiwert	Ψ	–	1.00				
Lebensdauer	a	–	35				
Unterhalt			ja				
Nachrüstbarkeit			ja				
Stromproduktion			ja				
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–					
f_m 125		–	n.a.				
f_m 250		–	n.a.				
f_m 500		–	n.a.				
f_m 1000		–	n.a.				
f_m 2000		–	n.a.				
f_m 4000		–	n.a.				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	2'370'000				
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	395'000				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	1'140				
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	190				
Aussentemperatur (Luft) Nacht, 21.6 m	θ_a	°C	22.4				
Aussentemperatur (Luft) Tag, 21.6 m	θ_a	°C	33.8				

	Gesamt	Literatur
spez. KW	spez. KW	PV / Glas
0.12		Zürcher
		Zürcher
		Zürcher
		Cekon
		Huizenga
		Cekon
		Cekon
		SN 592000:2012
		www.swissolar.ch
		KBOB
	395'000	KBOB
	190	

Literatur:

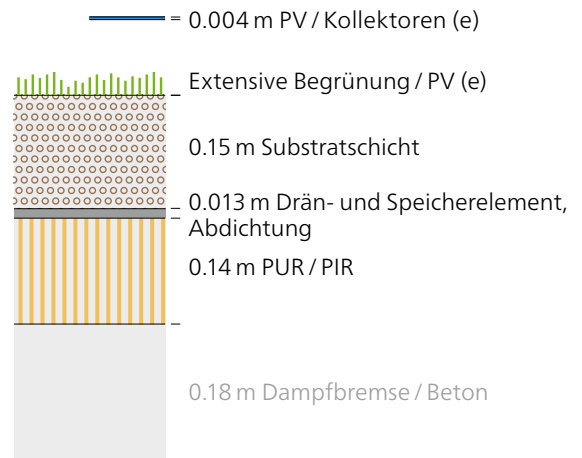
4.7.9 Dachkonstruktion 50% PV/Kollektoren, 50% Extensivbegrünung (D_Photovoltaik_Extensiv_Begrünung)

Ansicht



Quelle: www.contec.ch

Aufbau



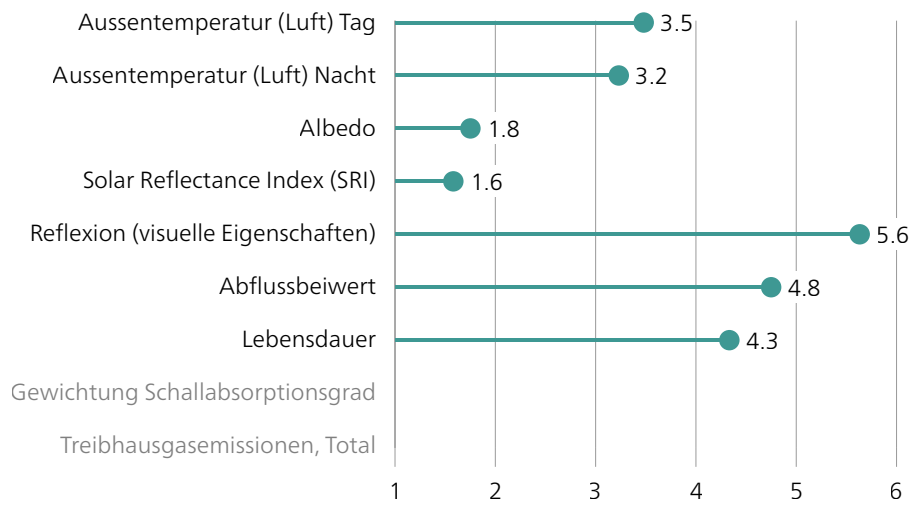
Materialdaten

		Mischwert ext. Begrünung/PV, trocken	Mischwert ext. Begrünung/PV, feucht
Aussentemperatur (Luft) Tag	°C	33.9	33.8
Aussentemperatur (Luft) Nacht	°C	22.1	22.1
Albedo	–	0.18	0.18
Solar Reflectance Index (SRI)	–	10	10
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	–	0.14	0.14
Abflussbeiwert	–	0.40	0.40
Lebensdauer	a	40	40
Gewichtung Schallabsorptionsgrad	–	n.a.	n.a.
Treibhausgasemissionen, Total	kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!	#WERT!

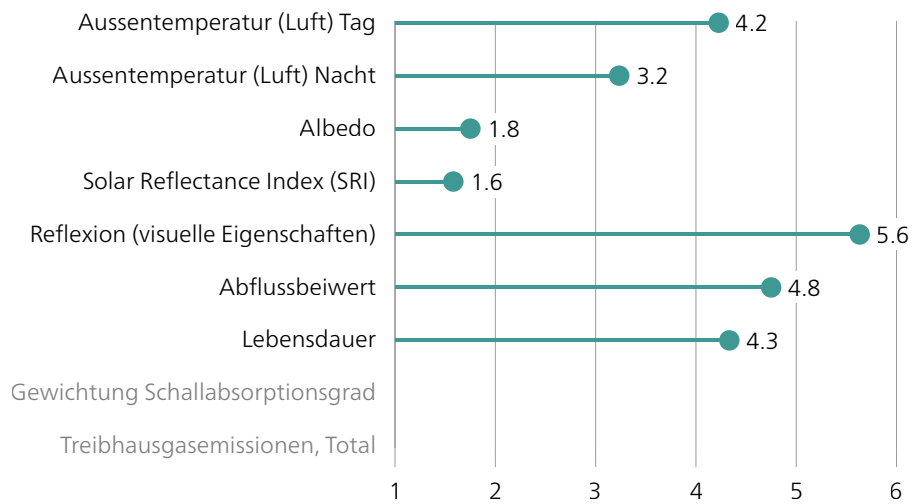
Kommentare: Es werden seitens der Kantone z.T. Mindestschichtdicken für das Substrat verlangt und regionale Ansaaten vorgeschrieben. Brandschutzrichtlinien sind einzuhalten. Ggf. ist die Feuerpolizei einzubinden.

Bewertung

Mischwert ext. Begrünung/PV, trocken



Mischwert ext. Begrünung/PV, feucht



Grösse	Symbol	Einheit	Materialien		
			Mischwert ext. Begrü- nung/PV, trocken	Mischwert ext. Begrü- nung/PV, feucht	Grün und Substratschicht
			Kennwert	Kennwert	Kennwert (m) spez. KW
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}			1'040 0.15 156.00
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$			0.71 1'000
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$			1.04
Thermal conductivity (Wärmeleitfähigkeit)	k (GB) λ (D)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$			0.78
Thermal diffusivity (Temperaturleitfähigkeit)	κ (GB) a (D)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$ m^2/s			7.5E-07
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$			900
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$ $\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1/2} \text{K}^{-1}$			0.90 0.05
Eindringtiefe, 24 h	δ	m			0.143
Albedo	α	–	0.18		0.20
Emissivität	ϵ	–	0.87		0.90
Solar reflectance index (SRI)	SRI	–	10.00		0.19
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	–	0.14		0.00
Wasseraufnahmekoeffizient	w	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$ $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	n.a.		n.a.
Abflussbeiwert	Ψ	–	0.40		0.40
Lebensdauer	a	–	40		40
Unterhalt					ja
Nachrüstbarkeit					nein
Stromproduktion					nein
Schallabsorptionsgrad bei Oktoavband-Mittelfrequenz von	α	–			
f_m 125		–	n.a.		n.a.
f_m 250		–	n.a.		n.a.
f_m 500		–	n.a.		n.a.
f_m 1000		–	n.a.		n.a.
f_m 2000		–	n.a.		n.a.
f_m 4000		–	n.a.		n.a.
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/kg	n.a.		n.a.
Umweltbelastungspunkte, Total	UBP 2021	UBP/m ² Erzeugnis	#WERT!		#WERT!
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro kg Erzeugnis	n.a.		n.a.
Treibhausgasemissionen, Total		kg CO ₂ -Äquiv. pro m ² Erzeugnis	#WERT!		#WERT!
Aussentemperatur (Luft) Nacht, 21.6 m	θ_a	°C	22.1	22.1	
PET Tag, 21.6 m	PET	°C	37.0	36.8	
Aussentemperatur (Luft) Tag, 21.6 m	θ_a	°C	33.9	33.8	

Anmerkungen: Es werden seitens der Kantone z.T. Mindestschichtdicken für das Substrat verlangt und regionale Ansaaten vorgeschrieben. Brandschutzrichtlinien sind einzuhalten. Ggf. ist die Feuerpolizei einzubinden.

5 Anhang 1: Methodik Materialkatalog

5.1 Auswahl Materialien

Der Materialkatalog fokussiert auf Wand-, Dach- und gebäudenahe Bodenmaterialien. Es werden Materialien der folgenden Gruppen untersucht:

- Zweischalige Wandkonstruktionen (Abkürzung ZW_)
- Verputzte Aussendämmung (Abkürzung VA_)
- Glasfassade / Leichtbau (Abkürzung LB_)
- Hinterlüftete Fassade (Abkürzung HF_)
- Reflektierende Anstriche Wand (Abkürzung Reflektierender_Anstrich_)
- Umgebung Boden (B_)
- Dächer (D_)

Die Auswahl der Materialien orientiert sich in Absprache mit den Projektpartnern an der modernen, städtischen Schweizer Baulandschaft. Angaben, auf welchem Niveau die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) festgelegt sind und Angaben zu den U-Werten der einzelnen Konstruktionen finden sich in Kapitel 5.1.2. und 5.1.4.

5.1.1 Benennung Materialien

Bei der Benennung der Materialien und Konstruktionen kommt die Systematik gemäss Abb. 1 im Abkürzungsverzeichnis zum Einsatz.

5.1.2 Berücksichtigung von mehrschichtigen Konstruktionen

Für Materialangaben werden Kennwerte jeweils für die Materialisierung der äussersten Schicht angegeben. Speziell beim Farbanstrich beziehen sich die Werte (z. B. Speicherfähigkeit) damit auf eine sehr dünne Schicht. Aus diesem Grund werden die Materialien für einige Parameter (siehe Tabelle 10) in einer Kombination betrachtet (z. B. Farbanstrich auf Putz). Dabei sollen immer die Schichten, welche nach aussen thermisch wirksam sind, berücksichtigt werden.

Im Detail werden damit folgende Festlegungen getroffen:

- Wandaufbauten / Flachdachkonstruktionen mit Wärmedämmung: Wandaufbau von aussen nach innen bis und mit Wärmedämmung. Bei einer Kompaktfassade (Putz und Dämmung auf tragender Wand) werden Putz und Wärmedämmung berücksichtigt. Die raumseitige Schicht (hier die tragende Wand) ist durch die Dämmschicht vom Aussenklima abgekoppelt und beeinflusst das Mikroklima aussen nicht. Daher wird sie nicht berücksichtigt.
Angaben zur Simulation siehe Kapitel 6.2.1
- Wandaufbauten ohne Wärmedämmung: Bei diesen Bauteilen (z. B. Farbanstrich auf Putz) wird die tragende Wand berücksichtigt, da es keine entkoppelnde Dämmschicht gibt.
- Wandaufbauten / Steildachkonstruktionen mit belüfteten Luftschichten: nur die aussenseitig der Luftschicht befindliche Konstruktion wird berücksichtigt. Die zirkulierende Luft entkoppelt die aussenseitige Wandverkleidung (z. B. Holzschalung) von der übrigen Wandkonstruktion.
Angaben zur Simulation siehe Kapitel 6.2.1
- Boden: nur Belag
Angaben zur Simulation siehe Kapitel 6.2.1
- Sonderfall Rasengittersteine: Hier wird bei allen Parametern nur das Material berücksichtigt: Ausnahme: Simulation (siehe Kapitel 6.2.1) und Treibhausgasemissionen (Berücksichtigung Füllung der Löcher mit Split (da keine Angaben für Erde verfügbar sind)).

Die Fassadenbauteile und Dachaufbauten erfüllen dabei die U-Werte gemäss Tabelle 5. Bei der Berechnung der U-Werte wird das gesamte Bauteil berücksichtigt.

Tabelle 5 U-Werte der Fassadenbauteile.

Konstruktionstyp (-)	Beispielmaterial (-)	U-Wert W/(m ² K)	Kommentar (-)
Neubau: diverse Materialien	VA_Kompaktfassade_EPS, ZW_Zweischalenmauerwerk_Kern- dämmung, D_Extensiv	0.17	Einzelanforderung an den winterlichen Wärmeschutz Energieverordnung Basel- Stadt, Anhang 1, 772.110, Stand 01.10.2020
Sanierung: Einschalenbacksteinmauerwerk mit Dämmputz / Aerogel	VA_Einschalenbacksteinmauer- werk_Dämmputz, VA_Einschalenbacksteinmauer- werk_Aerogeldämmputz	0.40	Maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient zur Oberflächenkondensatfreiheit gemäss SIA 180:2014 [17]
Sanierung: Einschalenbacksteinmauerwerk mit reflektierendem Anstrich	Reflektierender_Anstrich	0.79	Annahme: unsaniertes Bestandsmauerwerk

5.1.3 Farbgebung der Materialien

Materialien mit farbneutraler Oberflächenbehandlung

Für Baustoffe wie Sichtbeton, Naturholz, oder Stein wird die natureigene Materialfarbe berücksichtigt.

Farbwahl verputzte und/oder gestrichene Bauteile

Für Bauteile, die eine unterschiedliche Farbgebung der Oberfläche haben können, werden drei Werte angegeben. Zur Orientierung für den Leser können bestimmten Albedowerten gemäss [18] Begrifflichkeiten und Farben zugeordnet werden:

- Sehr hell (im Weiteren «hell»): Albedo 0.75, Beispielfarbe: helles weiss
- Mittelhell (im Weiteren «mittel»): Albedo 0.45, Beispielfarbe: grün
- Dunkel: Albedo: 0.26, Beispielfarbe: braun, dunkelgrau

Die Strahlungsdaten werden aus [19] für einen Putz mit mittlerer Körnung (medium granitex) entnommen.

5.1.4 Aufbau der Materialien

In Tabelle 6 sind die untersuchten Materialien mit ihren für das Mikroklima wirksamen Schichten, ihrer Farbe und dem resultierenden U-Wert dargestellt. Tabelle 8 zeigt den Konstruktionsaufbau. Mit schwarzer Schrift sind hier die für das Mikroklima aussen wirksamen Schichten eingetragen, die graue Schrift zeigt nicht wirksamen Schichten.

Tabelle 6 Materialien und Angabe der für das Mikroklima wirksamen Schicht(en) für Fassaden und Böden. «Baualter» bezeichnet den Gebäudezustand, bei dem der Konstruktionstyp am häufigsten anzutreffen ist. Bei der Berechnung der U-Werte wird das gesamte Bauteil berücksichtigt. Anmerkung: im Materialkatalog wird statt des Begriffes «einfach belüftet» die Bezeichnung «belüftet» verwendet.

Typ Konstruktion	Bezeichnung	Konstruktion	Für das Mikroklima nach aussen "wirksame" Schicht	Farbe	Baualter	U-Wert
					(-)	
Zweischalige Wandkonstruktionen	ZW_Sichtbetonwand_Kerndämmung	Sichtbetonwand mit Kerndämmung, Betonfertigteil aussen ca. 8 cm dick	Beton, 8 cm, Kerndämmung	grau	Neubau	0.17
	ZW_Zweischalenmauerwerk_Kerndämmung	Zweischalenmauerwerk mit Kerndämmung, Sichtbackstein aussen ca. 11.5 cm dick	Backstein aussen 11.5 cm, Kerndämmung	dunkelbraun	Neubau	0.17
	ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschicht	Zweischalenmauerwerk verputzt, Backstein aussen 12 cm, innen 15 cm, dazwischen Luftschicht	Backstein aussen 12 cm	hell/mittel/dunkel	Neubau	0.17
Verputzte Aussendämmung	VA_Einschalbacksteinmauerwerk_Dämmputz	Einschalbacksteinmauerwerk mit 7 cm Hagatherm Dämmputz	gesamte Konstruktion	hell/mittel/dunkel	Sanierung	0.39
	VA_Einschalbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz	Einschalbacksteinmauerwerk mit 4 cm Aerogeldämmputz	gesamte Konstruktion	hell/mittel/dunkel	Sanierung	0.37
	VA_Kompaktfassade_EPS	Kompaktfassade (EPS) mit 8 mm Putz	EPS und Putz, 8 mm	hell/mittel/dunkel	Neubau	0.17
	VA_Kompaktfassade_Steinwolle	Kompaktfassade (Steinwolle) mit 8 mm Putz	Steinwolle und Putz, 8 mm	hell/mittel/dunkel	Neubau	0.16
Glasfassade / Leichtbau	LB_Glasfassade	Glasfassade (g-Wert 0.3)	Glas, äussere Schicht		Neubau	0.70
	LB_Glasfassade_Sonnenschutz	Glasfassade mit Sonnenschutz	Sonnenschutz (Lamellen)	hell/dunkel	Neubau / Sanierung	
	LB_Sandwichpaneel	Sandwichpaneel (Leichtbaufassade Gewerbe-, Industriebau)	Stahlblech und Dämmung	blech/hell/dunkel	Neubau	0.16
Hinterlüftete Fassade	HF_Holzverkleidung	Holzverkleidung vor Holzständerwand mit Aussenwärmedämmung und Lattenrost	Holzverkleidung	hellbraun	Neubau	0.17
	HF_Photovoltaik	PV (hinterlüftet, Dämmung Steinwolle)	PV	dunkelblau	Neubau	0.17
	HF_Metallblechverkleidung	Metallblechverkleidung (hinterlüftet)	Metallblech	blech/hell/dunkel	Neubau	0.17
	HF_Faserzementverkleidung	Faserzementverkleidung (Eternit)	Faserzement (Eternit)	natur/hell/mittel/dunkel	Neubau	0.17
	HF_Steinverkleidung	Kunststein / Natursteinverkleidung (hinterlüftet)	Kunststein	mittelgrau	Neubau	0.17
	HF_Begrünungselement	Vorgehängtes Begrünungselement	Bepflanztes Keramikelement mit Substrat auf Beton	grün	Neubau	0.17
Anstriche Wand	Reflektierender_Anstrich	Reflektierender Anstrich auf Putz und Einschalmauerwerk (innovativer Anstrich, "cool colour")	Anstrich, Putz und Untergrund	hell/mittel/dunkel	Sanierung	0.79
Umgebung (Boden)	B_Rasengittersteinpflasterung	Rasengittersteinpflasterung für Wege/befahrbare Flächen	Rasen und Rasengitterstein	mittelgrau/grün		
	B_Betonbelag	Betonbelag	Betonbelag und 50 cm Erde	hellgrau		
	B_Betonsteinpflasterung	Betonsteinpflasterung für Wege, befahrbar	Betonplatten, Kiesbett und Erde (Kies und Erde zusammen 50 cm)	grau		
	B_Steinplattenpflasterung	Steinplattenpflasterung für Wege	Steinplatten, Kiesbett und Erde (Kies und Erde zusammen 50 cm)	mittelgrau		
	B_Asphalt	Schwarzbelag (Asphalt)	Asphalt, Bindeschicht und Tragschicht (zusammen 50 cm)	dunkel/hell reflektierend		
	B_Whitetopping_auf_Asphalt	Betonbelag auf Asphalt	Betonschicht, Asphalt, Bindeschicht und Tragschicht (zusammen 50 cm)	hellgrau		
	B_Kiesbelag	Kiesbelag	Kies und 50 cm Erde	mittelgrau		
	B_Rasen / Wiese	Grünfläche (Rasen)	Rasen auf Erde, 50 cm	grün		
	B_Chaussierung	Chaussierung (Wassergebunden Deckschicht)	Splitt, bindiger Kies und Kies	hellgrau		

Tabelle 7 Materialien und Angabe der für das Mikroklima wirksamen Schicht(en) für die Dächer. «Baulter» bezeichnet den Gebäudezustand, bei dem der Konstruktionstyp am häufigsten anzutreffen ist. Bei der Berechnung der U-Werte wird das gesamte Bauteil berücksichtigt.

Typ Konstruktion	Bezeichnung	Konstruktion	Für das Mikroklima nach aussen "wirksame" Schicht	Farbe	Baulter	U-Wert
					(-)	(W/m ² K)
Steildach	D_Ziegel	Dachkonstruktion einfach belüftet mit Ziegeldeckung	Ziegel	braun, dunkel	Neubau	0.17
	D_Metall	Dachkonstruktion einfach belüftet mit Metalldeckung	Metallblech	blech/hell/dunkel	Neubau	0.17
	D_Faserzement	Dachkonstruktion einfach belüftet mit Faserzementdeckung	Faserzement (Eternit)	hell/mittel/dunkel	Neubau	0.17
Flachdach	D_Bitumen	Dachkonstruktion ohne Schutz- und Nutzschichten	Bitumen und Dämmung	Schwarz	Neubau	0.17
	D_Kies	Dachkonstruktion bekies	Kies, Bitumen und Dämmung	mittelgrau	Neubau	0.17
	D_Extensiv_Begrünung	Dachkonstruktion mit Extensivbegrünung	Substratschicht und Dämmung	grün	Neubau	0.17
	D_Intensiv_Begrünung	Dachkonstruktion mit Intensivbegrünung	Substratschicht und Dämmung	grün	Neubau	0.17
	D_Photovoltaik	Dachkonstruktion vollflächig mit PV/Kollektoren	PV	dunkelblau	Neubau / Sanierung	0.17
	D_Photovoltaik_Extensiv_Begrünung	Dachkonstruktion 50% PV/Kollektoren, 50% Extensivbegrünung	PV und extensive Begrünung	dunkelblau/grün	Neubau	0.17
						0.17

Tabelle 8 Materialien und Konstruktionsaufbauten für Fassaden und Böden. Farbcode: die Schichten, welche nach aussen nicht thermisch wirksam sind, haben die Schriftfarbe grau.

Typ Konstruktion	Bezeichnung	Aufbau: Schichten von aussen nach innen (schwarz: wirksame Schichten)											
		Schicht 1			Schicht 2			Schicht 3			Schicht 4		
		Material	ρ (m)	λ (kg/m ³)(W/mK)	Material	ρ (m)	λ (kg/m ³)(W/mK)	Material	ρ (m)	λ (kg/m ³)(W/mK)	Material	ρ (m)	λ (kg/m ³)(W/mK)
Zweischalige Wandkonstruktionen	ZW_Sichtbetonwand_Kerndämmung	Beton	0.08	2400	2.0	EPS	0.20	15	0.035	Beton	0.18	2400	2.5
	ZW_Zweischalenmauerwerk_Kerndämmung	Sichtbackstein	0.115	1800	1.8	Steinwolle	0.18	38	0.035	Backstein	0.15	1000	0.3
	ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschicht	Putz	0.008	1800	0.87	Backstein	0.12	1000	0.3	Luft	0.04		
Verputzte Aussendämmung	VA_Einschalbacksteinmauerwerk_Dämmputz	Putz	0.006	1500	0.5	Putz (Hagatherm)	0.07	220	0.054	Hochlochziegel	0.36	750	0.33
	VA_Einschalbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz	Putz	0.006	1500	0.5	Putz (Aerogel)	0.04	220	0.028	Hochlochziegel	0.36	750	0.33
	VA_Kompaktfassade_EPS	Putz	0.008	1800	0.87	EPS	0.22	15	0.038	Beton	0.18	2400	2.5
	VA_Kompaktfassade_Steinwolle	Putz	0.008	1800	0.87	Mineralfaser	0.20	105	0.034	Beton	0.18	2400	2.5
Glasfassade / Leichtbau	LB_Glasfassade	Glas	0.006	2500	1.00	Argon	0.012	1.7	0.017	Glas	0.006	2500	1
	LB_Glasfassade_Sonnenschutz	Aluminium	4E-04	2700	160	Luft	0.1			Glas	0.006	2500	1
	LB_Sandwichpanel	Stahlblech	6E-04	7800	50	PIR	0.14	30	0.022	Stahlblech	6E-04	7800	50
Hinterlüftete Fassade	HF_Holzverkleidung	Eiche	0.016	737	0.17	Luft	0.04			DWD-Platte	0.016	500	0.1
	HF_Photovoltaik	PV	0.007	2500	1.00	Blaßglas	0.02	500	0.09	Luft	0.04		
	HF_Metallblechverkleidung	Aluminium / Blech	0.002	2700	160	Luft	0.03			Steinwolle	0.28	70	0.034
	HF_Faserzementverkleidung	Faserzement	0.008	2000	0.48	Luft	0.03			Steinwolle	0.28	70	0.034
	HF_Steinverkleidung	Granit	0.03	2750	2.8	Luft	0.03			Steinwolle	0.28	70	0.034
	HF_Begrünungselement	Gesamtes Element	0.025	1481	0.5	Substrat (Blähton)	0.08	1481	0.5	Beton	0.03	1481	0.5
Anstriche Wand	Reflektierender_Anstrich	Ref. Anstrich	0.001			Putz	0.008	1500	0.87	Hochlochziegel	0.36	750	0.33
Umgebung (Boden)	B_Rasengittersteinpflasterung	Beton/Gras	0.08	1450	2	Sand	0.05	1700	1.6	Kies	0.1	1800	0.7
	B_Betonbelag	Beton	0.18	2200	1.6	Kies	0.15	1800	0.7	Erde	0.5	1700	0.7
	B_Betonsteinpflasterung	Beton	0.08			feiner Split	0.03			Kies (Trageschicht)	0.2		
	B_Steinplattenpflasterung	Sandstein	0.03			feiner Split	0.03			Kies (Trageschicht)	0.2		
	B_Aspphalt	Asphalt	0.04			Beton	0.08			Erde/Kies	0.5		
	B_Whitetopping_auf_Aspphalt	Beton	0.075			Asphalt	0.075			Beton	0.08		
	B_Kiesbelag	Kies	0.2	1800	0.7	Erde	0.5	1700	0.7				
	B_Rasen / Wiese	Rasen/Erde											
	B_Chaussierung	Spplitt / Brechsand	0.01	1700	0.7	Kies (Netztaler)	0.05	1700	0.7	Kiesgemisch	0.25	1700	0.7

Tabelle 9 Materialien und Konstruktionsaufbauten für Dächer. Farbcode: die Schichten, welche nach aussen nicht thermisch wirksam sind, haben die Schriftfarbe grau.

Typ Konstruktion	Bezeichnung	Schicht 1			Schicht 2			Schicht 3			Schicht 4		
		Material	(m)	ρ (kg/m ³)	λ (W/(mK))	Material	(m)	ρ (kg/m ³)	λ (W/(mK))	Material	(m)	ρ (kg/m ³)	λ (W/(mK))
Steildach	D_Ziegel	Dachziegel	0.012	2075	1.000	Luft/Konterlattung	0.06			Holzweichfaserplatte	0.04	270	0.048
	D_Metall	Alublech (eloxiert)	0.0008	2700	160.000	Holzschalung	0.024	500	0.130	Luft/Konterlattung	0.04		
	D_Faserzement	Faserzement	0.008	2000	0.480	Luft/Konterlattung	0.08			Holzweichfaserplatte	0.04	270	0.048
Flachdach	D_Bitumen	Bitumen	0.01	1050	0.700	PUR/PIR	0.14	30	0.025	Dampfbremse / Beton	0.18	2400	2.500
	D_Kies	Kies	0.05	1800	0.700	Bitumen	0.01	1050	0.700	PIR	0.14	30	0.025
	D_Extensiv_Begrünung	Substratschicht	0.15	1040	0.779	Drän- und Speicherelement, Abdichtung	0.011	1050	0.700	PIR	0.14	30	0.025
	D_Intensiv_Begrünung	Substratschicht	0.55	1135	0.792	Drän- und Speicherelement, Wurzelschutz und Abdichtung	0.015	1050	0.700	PIR	0.14	30	0.025
	D_Photovoltaik	PV	0.004	2500	1.000	Luft/Tragsystem	0.1			Kies	0.05	1800	0.700
	D_Photovoltaik_Extensiv_Begrünung	PV/Substratschicht für ext. Begrünung	0.15	1060	0.385	Drän- und Speicherelement, Abdichtung	0.13	1050	0.700	PIR	0.14	30	0.025

5.1.5 Bewertung der Materialien

Um eine Übersicht über zentrale Eigenschaften eines Materials zu erhalten, werden für die Böden neun und für die Wände und Dächer acht Parameter herausgegriffen und bewertet. Die Bewertung jedes Parameters erfolgt mit einer Skala (6 = sehr gut, 1 = ungenügend). Für jeden Parameter werden die Materialien jeweils innerhalb der Gruppe Fassadenmaterial, Dach und Boden verglichen. Das innerhalb der Gruppe beste Material (z. B. mit der tiefsten PET 30.1 °C) wird mit 6 Punkten bewertet, das innerhalb der Gruppe schlechteste Material (z. B. mit der höchsten PET 36.4 °C) wird mit einem Punkt bewertet. Zwischenwerte werden linear interpoliert. Aus den Bewertungen für jeden der neun (Böden), bzw. acht (Fassaden, Dächer) Parameter gemäss Tabelle 2 kann für jedes Material eine Gesamtbewertung erfolgen. Bei der Gesamtbewertung werden die Punkte aus jedem bewerteten Bereich addiert. Es erfolgt keine Gewichtung der einzelnen Parameter. Materialien mit einer insgesamt hohen Punktzahl haben in mehreren Bereichen eine gute Bewertung erhalten, verfügen also über vorteilhafte Eigenschaften. Die Gesamtbewertung ist damit bewusst einfach gehalten. Sie soll lediglich einen ersten Anhaltspunkt für die Einschätzung des Materials geben.

Umgang mit fehlenden Parametern (Potentialabschätzung)

Da bei einigen Materialien nicht für alle Parameter Angaben existieren, sind die Gesamtbewertungen mit einer Potentialabschätzung versehen. Sie zeigt an, wie hoch die Bewertung wäre, wenn in den fehlenden Bereichen jeweils die maximale Bewertung «6» erreicht würde. Wäre für die fehlenden Bereiche nur die minimale Bewertung von «1» gegeben, so wäre die Endbewertung pro fehlenden Parameter um einen Punkt höher als das aktuelle Ergebnis. Zum Gesamtergebnis wird also jeder fehlende Parameter mit einem Punkt hinzuaddiert (da dies die Bewertung des Materials im schlechtesten Fall ist). Beispiel: für ein Fassadenmaterial fehlen zwei Parameter. Die Gesamtbewertung beträgt 23.5 (ohne die fehlenden Parameter beträgt sie 21.5).

Anmerkung: Sollte zukünftig ein fehlender Wert für einen Parameter ergänzt werden können, so ist es möglich, dass sich die gesamte Bewertung für den Parameter verschiebt. Dies ist dann der Fall, wenn der ergänzte Wert den bisher höchsten Wert überschreitet, oder den bisher tiefsten Wert unterschreitet. Begründung: die höchste (6) und tiefste (1) Bewertung beziehen sich auf das schlechteste und das beste Ergebnis für den Parameter innerhalb einer Gruppe (z. B. Böden). Als Beispiel seien Werte zwischen 50 und 100 angenommen. Liegt nun der ergänzte Wert bei 30, so verschiebt sich die Bewertung entsprechend.

5.2 Berücksichtigte Grössen des Materialkatalogs

5.2.1 Übersicht

Eine Übersicht zu den berücksichtigten Grössen im Materialkatalog zeigt Tabelle 10.

Tabelle 10 Übersicht über die Grössen für den Materialkatalog.

Grösse	Symbol	Einheit	Formel	Berücksichtigte Schicht	Literatur
Density (Rohdichte)	ρ	kg m^{-3}		aussenseitige Schicht	
Specific heat (Spezifische Wärmekapazität)	c	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$		aussenseitige Schicht	
Heat capacity (Wärmekapazität)	C	$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	$C = \rho c$	aussenseitige Schicht	Oke, 2017 [20]
Thermal conductivity (GB) Wärmeleitfähigkeit (D)	k λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$		aussenseitige Schicht	Oke, 2017 [20] Zürcher
Thermal diffusivity (GB) (Temperaturleitfähigkeit) (D)	κ a	$\text{m}^2 \text{s}^{-1} 10^{-6}$ m^2/s	$a = \lambda \frac{\lambda}{\rho c}$	aussenseitige Schicht	
Thermal admittance / thermal inertia (thermische Trägheit)	μ_s	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$	$\mu = k C^{-1/2}$	aussenseitige Schicht	[21], [22]
Wärmeindringzahl	b	$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1/2}$	$b = \sqrt{\lambda \rho c}$	aussenseitige Schicht	
Eindringtiefe	δ	m	$\delta = \sqrt{\frac{\lambda T}{\rho c \pi}}$	aussenseitige Schicht	
Albedo	α	-		aussenseitige Schicht	
Emissivität	ϵ	-		aussenseitige Schicht	[20]
Solar Reflectance Index (SRI)	SRI	-	$SRI = \frac{T_b - T_s}{T_b - T_w}$ $T_b = \text{black pattern temp., K}$ $T_w = \text{white pattern temp., K}$ $T_s = \text{steady-state surface temp., K}$	aussenseitige Schicht	[19]
Reflexion (visuelle Eigenschaften)	ρ	-	-	aussenseitige Schicht	
Wasseraufnahme- koeffizient (auch als A-Wert oder A_w - Wert bekannt)	w	$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$	$w = \frac{W}{\sqrt{t}}$ $W = \text{Wasseraufnahme je Flächeneinheit, kg /m}^2$ $t = \text{Zeit, h}$	aussenseitige Schicht	

Grösse	Symbol	Einheit	Formel	Berücksichtigte Schicht	Literatur
Abflussbeiwert	Ψ	-	$\Psi = \frac{A_o}{N}$ <i>A_o = Teil des Niederschlagsereignisses, der abfliesst</i> <i>N = Gesamtniederschlag</i>	aussenseitige Schicht	
Lebensdauer		a		Konstruktion	
Unterhalt				Konstruktion	
Nachrüstbarkeit				aussenseitige Schicht	
Stromproduktion				aussenseitige Schicht	
Schallabsorptionsgrad bei best. Terz, bzw. Oktavbandmittelfrequenz	α	-		Konstruktion	
Umweltbelastungspunkte, Herstellung und Entsorgung	UBP 2013	UBP/ Mengen- einheit		Konstruktion	
Treibhausgasemissionen, Herstellung und Entsorgung		kg CO ₂ -Äquiv. Pro m ² /m ³ Erzeugnis		Konstruktion	
Aussentemperatur (θ_a) (Luft) Tag*	T _a	°C		Konstruktion	
Aussentemperatur (θ_a) (Luft) Nacht	T _a	°C		Konstruktion	
PET Tag**	PET	°C		Konstruktion	

* = für Dächer

** = für Fassaden und Böden

5.2.2 Erläuterungen zu einigen Grössen

Spektren Strahlung

In der Klimatologie werden die folgenden Definitionen verwendet [20]:

- Langwellige Strahlung (in der Erdatmosphäre): Bandbreite Wellenlängen 3-100 µm. Wird auch als Infrarotstrahlung bezeichnet.
- Kurzwellige Strahlung (abgegeben von der Sonne): im Bereich von 0.15 bis 3 (oder 4) µm. Auch als Solarstrahlung bezeichnet.
- Sichtbares Licht: 380 – 780 nm (0.38 – 0.78 µm)

Albedo

Mass für das Rückstrahlvermögen (Reflexionsstrahlung) von nicht selber leuchtenden, diffus reflektierenden (nicht spiegelnden) Oberflächen. Entspricht dem Verhältnis von rückgestrahlter zu einfallender Strahlung (Albedo 0.90 = 90 % Rückstrahlung). Messung mit Albedometer oder Zweifach-Pyranometer.

In der Klimatologie referenziert Albedo auf die kurzwellige (solare) Strahlung.

Albedo entspricht hier dem solaren Strahlungsreflexionsgrad (im Weiteren auch als solarer Reflexionsgrad bezeichnet).

Solar Reflectance Index (SRI)

Der SRI wurde von der ASTM (American Society for Testing and Materials) für horizontale und geneigte opake Flächen entwickelt. Seine Berechnung und Messung wird in [23] festgelegt. Dieser Index ermöglicht es, die relative stationäre Temperatur einer Oberfläche in Bezug auf die Temperatur einer weissen und einer schwarzen Standardoberfläche unter standardisierten Umgebungsbedingungen zu bestimmen. Mit dem Index können die Effekte von solarer Reflexion und thermischer Emissivität kombiniert betrachtet werden. Je höher der SRI-Wert ist, desto höher ist im Allgemeinen die solare Strahlungsreflexion und desto geringer ist die solare Strahlungsabsorption. In anderen Worten: je höher der SRI-Wert ist, desto geringer ist die Aufwärmung der Oberfläche infolge solarer Strahlung. Die Methode gilt für Oberflächen mit Emissionsgraden > 0.01 und Oberflächentemperaturen $< 423 \text{ K}$ (150 °C).

Die Standardbedingungen für die Berechnung des SRI-Wertes sind wie folgt definiert:

- Weisse Oberfläche: SRI = 100, solare Reflexion = 0.80, langwelliger Emissionsgrad: 0.90
- Schwarze Oberfläche: SRI = 0, solare Reflexion = 0.050, langwelliger Emissionsgrad: 0.90
- Lufttemperatur 310 K
- Himmelstemperatur 300 K
- Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Für mittlere Windgeschwindigkeit: $12 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$
- Solare Einstrahlung (kurzwellig) 1000 W/m^2

Mit diesen Parametern kann die stationäre Temperatur der Oberfläche entweder über eine Wärmebilanzgleichung iterativ gelöst werden. Alternativ kann die stationäre Temperatur (T_s) der Oberfläche mit einem empirischen Ansatz ermittelt werden (Formel gemäss ASTM E1980-11, da Standard nicht frei verfügbar entnommen aus [19]):

$$T_s (K) = 309.07 + \frac{1066.07 \alpha - 31.98 \varepsilon}{6.78 \varepsilon + h_c} - \frac{890.94 \alpha^2 + 2153.8 \alpha \varepsilon}{6.78 \varepsilon + h_c} \quad (1)$$

Dabei sind:

α = solare Absorption = $1 - \text{solare Reflexion}$

ε = langwelliger Emissionsgrad

h_c = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

Der SRI wird daraus wie folgt berechnet [19]:

$$SRI = 100 \frac{T_b - T_s}{T_b - T_w} \quad (-) \quad (2)$$

Dabei sind:

T_b = Referenztemperatur (stationär) schwarze Oberfläche (solare Reflexion 0.05, langwelliger Emissionsgrad: 0.90), K

T_w = Referenztemperatur (stationär) weisse Oberfläche (solare Reflexion 0.80, langwelliger Emissionsgrad: 0.90), K

Anmerkung zu Wänden: obwohl der SRI für horizontale Flächen gilt, trifft die Berechnungstheorie mit einer kleinen Einschränkung auch für Wände zu [24]. Die Einschränkung betrifft nach dem Verständnis der Berichtverfasser die empirische Gleichung 1, da in dieser die langwellige Abstrahlung in den Halbraum enthalten ist und Wände nur in den Viertelraum abstrahlen. Die Angaben sind also als eine Näherung zu betrachten.

Wasseraufnahmekoeffizient

Der Wasseraufnahmekoeffizient w (= Wassersaugfähigkeit) dient zur Beurteilung der Regenschutzwirkung einer Oberflächenschicht (z.B. Aussenputz, Beschichtung) und gibt an, wie viel Liter Wasser durch 1 m² Saugfläche hindurch in einer Stunde eingesaugt werden.

> 2.0 stark saugend, ≤ 2 Wasser hemmend, ≤ 0.5 Wasser abweisend, ≤ 0.001 wasserdicht

Abflussbeiwert

Der Abflussbeiwert Ψ beschreibt den Teil eines Niederschlagsereignisses, der direkt zum Abfluss gelangt (A_o) im Verhältnis zum Gesamtniederschlag (N). Er lässt sich wie folgt

$$\Psi = A_o / N \quad (3)$$

berechnen und ist ohne Einheit.

Die in der SN 592000:2012 «Anlagen für die Liegenschaftsentwässerung – Planung und Ausführung» [25] angegebenen Werte finden auch im Katalog Verwendung:

- Plätze und Wege mit Hartbelag: $\Psi = 1.0$
- Plätze und Wege mit Kiesbelag: $\Psi = 0.6$
- Plätze und Wege mit Ökosystem (Splittfugen): $\Psi = 0.6$
- Plätze und Wege mit sicherfähigem Belag: $\Psi = 0.6$
- Plätze und Wege mit Rasengittersteinen: $\Psi = 0.2$
- Wiesen ohne / mit Vernässung und Verdichtung: $\Psi = 0.1 - 0.25 / 0.35 - 0.55$

Lebensdauer

Ergänzend zum Thema «Unterhalt» wird der Parameter «Lebensdauer» aufgenommen. Dieser Begriff im Sinne der Nutzungsdauer beschreibt «innerhalb des Prognoseszenarios die angenommene Zeitspanne, nach der ein heute eingebautes Bauteil vermutlich ausgetauscht werden wird» [26]. Die «technische Lebensdauer» ist die Zeitspanne zwischen Errichtung und Ausfall [27]. Angaben, die im Materialkatalog für die Lebensdauer verwendet werden, beziehen sich auf diese beiden Angaben. Der Grund ist, dass in der Literatur beide Begriffe zu finden sind und nicht klar gegeneinander abgegrenzt werden. Klar abgegrenzt ist die wirtschaftliche Nutzungsdauer, auf die sich der Bericht nicht bezieht. Sie bezeichnet den «Zeitraum, in dem es unter den gegebenen Bedingungen sinnvoll ist, das Bauteil zu nutzen» [27].

Bei den im Katalog betrachteten Materialien (Fassade und gebäudenahe Böden) wird davon ausgegangen, dass in der Regel eine lange Lebensdauer vorteilhaft ist, da ein Ersatz erst später notwendig wird.

Unterhalt

Ursprünglich war die Berücksichtigung eines Parameters zur Abnutzung des Bodens geplant. Für den Abrieb Boden gibt es für Bodenplatten fünf Beanspruchungsgruppen. Allerdings würden alle Bodenmaterialien aussen in die Beanspruchungsgruppe fünf fallen.

Als Ersatz wird der Parameter «Unterhalt» (ja/nein) gewählt. Bei offenporigen Belägen wird so berücksichtigt, dass diese gereinigt werden müssen. Bei Anstrichen (z. B. cool coatings, reflektierende Anstriche) wird berücksichtigt, dass die Anstriche altern/verschmutzen und damit die Albedo reduziert wird.

Schallabsorptionsgrad

Die akustische Bewertung der Konstruktion erfolgt anhand der Schallabsorptionsgrade α der jeweiligen Konstruktion. Es werden, soweit vorhanden, die sechs Schallabsorptionsgrade der Oktavband-Mittelfrequenzen im Bereich von 125 Hz bis 4000 Hz angegeben.

Treibhausgasemissionen und UBP

Angegeben wird der Wert für Herstellung und Entsorgung. Bezeichnet als «Total». Die Nutzung ist damit nicht berücksichtigt. Da die Angaben zwischen den Ländern stark streuen und auch die Bilanzgrenzen nicht immer gleich definiert sind, wird, um die Vergleichbarkeit der Materialien untereinander zu gewährleisten, auf eine einzige Datenquelle aus der Schweiz zurückgegriffen [28]. Bei mehrschichtigen Konstruktionen werden hierbei die Schichten, welche nach aussen thermisch wirksam sind, berücksichtigt (siehe auch Kapitel 5.1.2).

Auswirkung Material auf Mikroklima (Hitzestress)

Zur Quantifizierung des Hitzestresses, der auf Personen im Aussenraum einwirkt, sind tagsüber die PET (physiological equivalent temperature) und nachts die Aussentemperatur (θ_a) relevant. Da das Modell der PET auf dem PMV-Modell basiert, wird dieses in nachstehendem Exkurs erläutert.

Exkurs: «Predicted-Mean-Vote Model» (PMV-Modell)

Aus dem Gebäudebereich bzw. für Innenräume bekannt ist das von P. O. Fanger entwickelte «Predicted-Mean-Vote Model» (PMV-Modell) [29]. Grundannahme ist dabei, dass das Wärmeempfinden des Menschen abhängig vom thermischen Gleichgewicht seines Körpers im Ganzen ist. Dieses Gleichgewicht wird von

- zwei körperlichen Parametern, (metabolischer Umsatz als Mass für die physische Aktivität und Wärmeschutzgrad der Bekleidung) und
- vier umgebungsklimatischen Parametern (Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte)

beeinflusst. Die Wahrnehmung eines gegebenen Innenraumklimas ist stark vom subjektiven Empfinden abhängig. Der dadurch entstehenden Streuung wird durch breiter gefasste Komfortbereiche, dem PMV, Rechnung getragen, die mit einer Aussage über den Unzufriedenheitsgrad, dem «predicted percentage of dissatisfied» (PPD), verknüpft sind. Der PPD-Index ist ein dem PMV-Index zugeordneter Prozentsatz, der mit dem mittleren Prozentsatz einer grösseren Anzahl von Versuchspersonen innerhalb der statistischen Unsicherheit übereinstimmt [30]. Anhand von den sechs Einflussfaktoren kann über die Berechnung des PMV-Index das Wärmeempfinden des Körpers vorausgesagt werden. Der Index bestimmt den zu erwartenden Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine grosse Personengruppe anhand einer 7-stufigen Klimabeurteilungsskala, die von «heiss» über «neutral» (als angestrebte Grösse) bis «kalt» reicht. Der PPD-Index prognostiziert den Anteil der Gruppe, der sich wahrscheinlich «zu warm» oder «zu kalt» fühlt, wobei stets von mindestens fünf Prozent Unzufriedenen ausgegangen wird ($PPD \geq 5\%$). Ein Wert von $PMV = 0 \pm 0.5$ bedeutet dabei thermische Behaglichkeit (Tabelle 11).

Diese Behaglichkeitsgleichung ist nur für stationäre Verhältnisse und Innenräume gültig. Für aussenklimatische Verhältnisse müssen vor allem die Strahlungsbedingungen im Freien berücksichtigt werden.

PET – Physiologisch Äquivalente Temperatur (tagsüber)

Dieses Modell geht auf das «Münchner Energiebilanz Modell für Individuen (MEMI)» zurück [31]. Dieses erweitert das PMV – Modell beträchtlich. Es fliessen hier die Energiebilanzgleichung des Körpers, die Gleichung für den Wärmefluss vom Körperkern zur Hautoberfläche und die Gleichung für den Wärmefluss von der Haut durch die Kleidung zur Kleidungsoberfläche ein. Damit können die Hauttemperatur, die Kleidungstemperatur und die Körperkerntemperatur berechnet werden. Diese Grössen werden dafür benötigt, die Energiebilanzgleichung zu lösen.

Vorgehen zur Berechnung der PET

- Definition aller Energiegewinne und –verluste des menschlichen Körpers (Energiebilanzgleichung) im Aussenraum (Modell MEMI)
- Berechnung der Hauttemperatur und der Körperkerntemperatur, die den Energiegewinnen und –verlusten des Körpers im Aussenraum entsprechen (Modell MEMI)
- Auflösen des Gleichungssystems nach der Lufttemperatur (mit den folgenden Festlegungen: Luftgeschwindigkeit (v) = 0.1 m/s, Dampfdruck (VP) = 12 hPa (entspricht einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % bei ca. 20 °C) und Strahlungstemperatur (T_{mrt}) = Aussentemperatur (θ_a). Damit wird sinnbildlich die Person in einen Innenraum ohne direkte Sonnenstrahlung versetzt und dort die Raumlufttemperatur bestimmt, die zu derselben Hauttemperatur und Körperkerntemperatur führt, welche die Bedingungen draussen hervorgerufen haben.
- Die resultierende Temperatur ist die gesuchte PET

Das Wärmeempfinden und die PET werden massgeblich von der Sonneneinstrahlung (kurzwelliger Strahlung) und dem Wind gesteuert. Eine Veränderung der Lufttemperatur wird dadurch teilweise kompensiert. Eine Bewertung der PET findet sich in Tabelle 11.

Tabelle 11 Klimabeurteilung mit dem PMV-Index und der PET (metabolische Rate 80 W und Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung 0.90 clo (leichter Anzug) [32].

Thermisches Empfinden	PMV	PET	
sehr heiss	> + 3.5	> 41 °C	Extreme Wärmebelastung
heiss	+ 2.5 – 3.5	35 - 41 °C	Starke Wärmebelastung
warm	+ 1.5 – 2.5	29 - 35°C	Mässige Wärmebelastung
Leicht warm	+ 0.5 – 1.5	23 - 29°C	Schwache Wärmebelastung
behaglich	- 0.5 – + 0.5	18 - 23 °C	Keine Belastung
Leicht kühl	- 0.5 – - 1.5	13 - 18 °C	Schwache Kältebelastung
kühl	- 1.5 – - 2.5	8 - 13 °C	Mässige Kältebelastung
kalt	- 2.5 – -3.5	4 - 8 °C	Starke Kältebelastung
sehr kalt	< - 3.5	< 4 °C	Extreme Kältebelastung

Die PET kann aus den Simulationsergebnissen des Mikroklimas berechnet werden. Die gesamten Formeln und ein Skript (Python) zur Berechnung finden sich in [33]. Das Skript zur Berechnung wurde von A. Wicki (damals Atmosphärenwissenschaften, Uni Basel) auf die Auswertung von ENVI-met Simulationen angepasst und für vorliegendes Projekt weiterentwickelt.

Lufttemperatur (θ_a) aussen (Tag), nur für Dächer

Da Dächer in der Regel nicht zum Aufenthalt von Menschen konzipiert sind, wird für die Beurteilung der Auswirkungen auf das Mikroklima die Aussentemperatur verwendet. Eine hohe Lufttemperatur verstärkt den Wärmeinseleffekt.

Lufttemperatur (θ_a) aussen (nachts)

Da nachts keine Solarstrahlung anfällt, ist für die Charakterisierung des Mikroklimas nachts die Aussentemperatur, θ_a eine gute Näherung.

5.3 Datengewinnung

Die meisten Daten können aus Datensammlungen oder Datenbanken bezogen werden. Die Daten zum städtischen Mikroklima werden im Rahmen des Projektes mittels Simulationen ermittelt (siehe Kapitel 5.5).

5.3.1 Kriterien für die Materialdatensuche aus Sammlungen

Allgemein soll der Materialkatalog nicht produktspezifisch sein. D.h., wenn Ziegel charakterisiert werden, sollen die Angaben für alle Tonziegel einer Farbgruppe gelten und nicht für ein spezifisches Firmenprodukt. Eine Ausnahme bilden innovative Materialien wie z. B. hochreflektierende Anstriche.

Quellen für die Datensuche, nach Häufigkeit:

- Allgemeinere Datensammlungen für Sonderthemen (z. B: Albedo verschiedener Baustoffe): Bücher, Fachartikel
- Herstellerangaben (Internet)

Verwendete Kennzeichnung für die Wertung der Informationsverfügbarkeit in den Tabellen (siehe auch Tabelle 3):

- Feld = blau: Information aus Herstellerunterlagen für das gesuchte oder ein sehr ähnliches Produkt ersichtlich
- Feld = olive: Information aus Materialdatenbank erhältlich für sehr ähnliches Material
- Feld = helles olive: Information aus Materialdatenbank erhältlich für Materialgruppe
- Feld = hellgrau «n.a.»: Keine Information erhältlich
- Feld = grau «n.a.»: Angabe nicht anwendbar
Beispiel: der Abflussbeiwert gilt für Böden und ist bei Wänden nicht anwendbar.
- Feld = weiss «#WERT!»: der Inhalt der Zelle wird berechnet, es fehlt jedoch mindestens ein nötiger Wert für die vorgesehene Berechnung.

5.3.2 Plausibilitätscheck Daten aus Sammlungen

Bei Datensammlungen zu einem Thema, z. B. Albedo oder Reflexionsgrad, kommt es vor, dass zu den Materialdaten die Angabe fehlt, auf welches Strahlungsspektrum sich die Daten beziehen. Wenn möglich, werden daher die zu prüfenden Datenlisten mit Daten für bekannte Materialien (z. B. Schnee) abgeglichen. Nur wenn diese gleich oder Abweichungen plausibel sind, wird die Datensammlung verwendet.

Die Daten werden untereinander dahingehend verglichen, ob berichtete Unterschiede zwischen den Materialien plausibel sind.

5.4 Auswahl zentrale Parameter und ihre Bewertung

Um eine Charakterisierung der Materialien in der Übersicht zu ermöglichen, werden im Rahmen des Projektes neun Parameter für eine Bewertung herausgegriffen. Die nachstehend genannten Parameter stammen aus fünf Themenbereichen:

- Auswirkung auf städtisches Mikroklima: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, Tag), Aussentemperatur (θ_a , Nacht)
- Strahlungstechnische Grössen: Albedo, Solar Reflectance Index, Visuelle Reflexion (Blendung)
- Nachhaltigkeit: Lebensdauer, Treibhausgasemissionen
- Akustische Eigenschaften: Gewichtung Schallabsorptionsgrad
- Versickerungsfähigkeit (Böden und Dächer): Abflussbeiwert

In der Bewertung wird zwischen Wand- und Bodenmaterialien differenziert. Die Materialien von Wand- und Bodenkonstruktionen werden getrennt verglichen. Die Bewertung erfolgt auf einer Skala, wobei das beste Material in der Gruppe mit einer «6» und das Schlechteste einer «1» bewertet wird.

5.4.1 Bewertung Schallabsorptionsgrad

Es werden die sechs Schallabsorptionsgrade der Oktavband-Mittelfrequenzen im Bereich von 125 Hz bis 4000 Hz angegeben. Um zusammenfassend einen Wert ausgeben und diesen bewerten zu können, wird wie folgt vorgegangen (Systematik entspricht [34]).

1. Ermittlung der Zwischenbewertung auf Basis des Schallabsorptionsgrades
Jeder der sechs Schallabsorptionsgrade wird mit der Bewertungskurve aus Abb. 54 bewertet. Die Kurve nimmt mit steigendem Schallabsorptionsgrad zu, da eine reduzierte Nachhallzeit im Aussenraum als wünschenswert gilt. Die Bewertungskurve entspricht in etwa dem umgekehrten Verlauf der Nachhallzeiten.

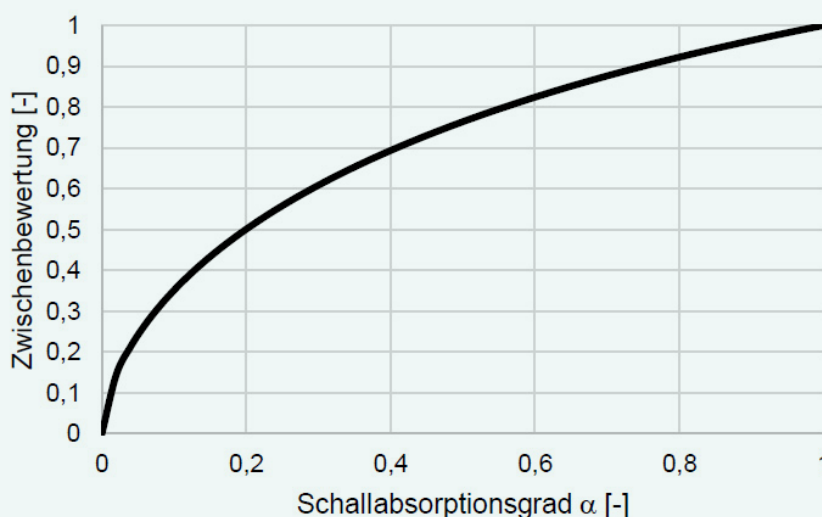


Abb. 54 Bewertungskurve zur Ermittlung der Zwischenbewertung in Abhängigkeit des Schallabsorptionsgrades α (entnommen aus [34]).

2. Gewichtung der Zwischenbewertung auf Basis der subjektiven Wahrnehmung der jeweiligen Frequenz
Die frequenzabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs wird durch eine Gewichtung der Zwischenbewertung berücksichtigt. Hier fließen die Zusammenhänge zwischen Schalldruckpegel, Lautstärkepegel und Frequenz sowie die Zusammenhänge von Lautstärkepegel und Lautheit ein. Als Referenzwert wird ein Schalldruckpegel von 70 dB angenommen. Zunächst werden die Lautstärkepegel bei den Oktavbandmitten-

Frequenzen ermittelt und in die entsprechende Lautheit umgerechnet. Schliesslich wird die Gewichtung jeder Frequenz bestimmt. Die Werte zeigt Tabelle 12.

Tabelle 12 Lautstärkepegel L_N , Lautheit N und Gewicht γ der Zwischenbewertung in Abhängigkeit der Frequenzen f ausgehend von einem Schalldruckpegel von 70 dB (entnommen aus [34]).

Frequenz f (Hz)	Lautstärkepegel L_N (phon)	Lautheit N (sone)	Gewicht γ (-)
125	69	7.5	0.122
250	74	10.6	0.172
500	74	10.6	0.172
1000	70	8	0.130
2000	73	9.8	0.161
4000	79	14.9	0.243

3. Berechnung der Endbewertung der Akustik auf Basis der gewichteten Zwischenbewertungen

Die Berechnung der Endbewertung erfolgt über Multiplikation der Zwischenbewertungen (Abb. 54) mit den zugehörigen Gewichten aus Tabelle 12 und anschliessender Addition aller gewichteten Zwischenbewertungen. Die Endbewertung beträgt maximal 1.0.

5.5 Böden für Grünflächen

5.5.1 Betrachtete Böden

Es werden zwei Bodentypen untersucht: Ein leichter natürlich vorhandener Torfboden und ein schwerer natürlich vorhandener Lehm-Sandboden. Diese werden im Materialkatalog «Boden mit erhöhtem organischem Anteil» und «Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil» genannt. Im Simulationsprogramm haben die Böden die folgenden Eigenschaften:

- Boden, erhöhter org. Anteil: Volumenanteil Wassergehalt bei Sättigung: 0.863 (m³/m³), Bezeichnung in ENVI-met: Nr. 13, Peat
- Boden, erhöhter min. Anteil: Volumenanteil Wassergehalt bei Sättigung: 0.410 (m³/m³), Bezeichnung in ENVI-met: Nr. 3, Loamy Sand

5.5.2 Eigenschaften von Torfersatzprodukten

Tabelle 13 Eigenschaften von natürlich vorhandenem Torf und Ersatzprodukten

		Schwarz- torf	Weiss- torf	Holz- fasern	Kokos- fasern	Rinden- humus	Grüngut- Kompost	Quelle
Wasserkapazität (qualitativ)	-	gut	gut	mittel	Gering	mittel	gut	[35]
Wasserrückhalte- vermögen	Vol-%	60-87%	40-85%	>35%	20-50%	40-55%	>50%	[5]
Luftkapazität (qualitativ)	-	gut	gut	gut	sehr gut	gut	gut	[35]
Luftkapazität	Vol-%	6-33%	11-58%	45-65%	40-70%	40%	30 %	[5]
Pflanzenverträglichkeit	-	sehr gut	sehr gut	gut	gut	sehr gut	gut	[35]
Schüttdichte, trocken	kg/TS/m ³	120-250	80-150	60-130	50-150	200-300	600	[5]
Rohdichte	kg/m ³	200-400	300	130	200	600	684	[36], [37]
UBP inkl. Nutzung	1000 UBP/m ³	260	260	22	520	65	860	[5], [36]
Treibhauspotential Abbau und Nutzung*	Kg CO ₂ - eq/m ³	350	350	9.5	85	32	90	[5], [36]

* = Keine Angabe zur Dauer. Da die Angaben alle aus einem Bericht stammen ist die Vergleichbarkeit gegeben.

Es zeigt sich, dass bezüglich des Treibhauspotentials einheimische Holzfasern und einheimischer Rindenhumus am vorteilhaftesten sind.

6 Anhang 2: Methodik und kritische Diskussion der Simulationen

6.1 Simulationsprogramm städtisches Mikroklima

Ziel der Simulationen ist es, Materialien hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das lokale Mikroklima zu untersuchen. Das verwendete Programm muss daher das Gebäude hinreichend genau abbilden, aber auch den städtischen Kontext realistisch berücksichtigen. Als Ausgabe sind sowohl Oberflächentemperaturen, besonders aber auch mittlere Strahlungstemperaturen und der daraus resultierende Hitzestress, denen ein Mensch im Aussenraum ausgesetzt ist, gewünscht (siehe Abb. 55). Im Rahmen der Vorarbeiten für die 1. Auflage wird entschieden, ENVI-met zu verwenden.

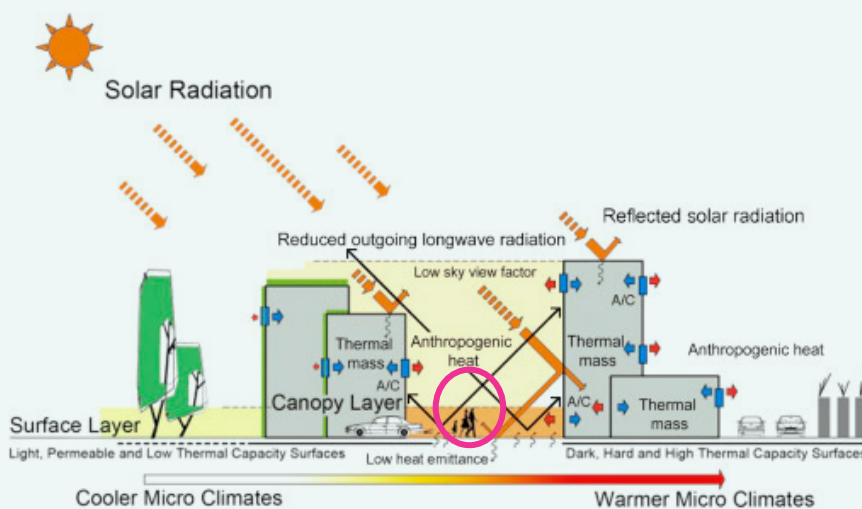


Abb. 55 Bezugspunkt für Bewertung des Wärmeinseleffekts in der Simulation (rosa Kreis). Quelle Abbildung: [38].

Die Simulationen der ersten Auflage wurden mit ENVI-met Version 4.4.5 erstellt, die Simulationen der zweiten Auflage mit ENVI-met 5.6.1. Die neue Programmversion unterscheidet sich von der Vorgängerversion durch erhebliche Anpassungen und Verbesserungen im Strahlungsmodell [39]. Da Testsimulationen mit ENVI-met 5.6.1 zeigen, dass sich der Versionswechsel speziell auf die Ergebnisse von hellen und dunklen Flächen auswirkt, werden alle Materialien der 1. Auflage nochmals berechnet. Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die Programmversion 5.6.1.

6.2 Randbedingungen der Simulationen des städtischen Mikroklimas

Die Auswirkung der einzelnen Materialien auf das Mikroklima eines typischen städtischen Areals wird anhand von mikroskaligen Stadtklima-Simulationen mit ENVI-met, Version 5.6.1, geprüft.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die getroffenen Annahmen für die Randbedingungen der Simulationen zusammengefasst.

6.2.1 Betrachtung Bauteile und Begrünungen

Mehrschichtige Konstruktionen und Wärmeschutz

Mit ENVI-met können Konstruktionsaufbauten mit maximal drei Schichten berücksichtigt werden. Wie in Kapitel 5.1.1 dargestellt ist, werden mehrschichtige Bauteile von aussen bis und mit Dämmschicht betrachtet (Beispiel: berücksichtigte Schichten bei einer Betonwand mit Kompaktfassade: Putz und Wärmedämmung). Da die Dämmschicht den inneren Teil (im Beispiel die Betonwand) vom Aussenklima abkoppelt, wirkt sich die Betonwand nicht auf das Aussenklima aus. Zur Bestimmung der Dämmschichtstärke wird für das gesamte Bauteil (Beispiel: berücksichtigte Schichten bei einer Betonwand mit Kompaktfassade: Putz, Wärmedämmung und Beton) der U-Wert berechnet. Die Bauteile erfüllen die in Kapitel 5.1.2 und 5.1.4 genannten U-Werte.

Bei Konstruktionen mit einer Luftschicht als Hinterlüftung wird programmbedingt die Luftschicht als ruhend (keine Luftzirkulation) angenommen. Damit ist der schlechteste Fall für das städtische Mikroklima abgebildet.

Auch für Böden gilt die Obergrenze von drei Schichten. Die Schichtdicke des Bodenpaketes beträgt mindestens 50 cm. Bei den Rasengittersteinen sind die Löcher mit Erde gefüllt.

Referenzkonstruktionen

Bei der Simulation wird jeweils ein Bauteiltyp (z. B. «Wand») variiert. Die anderen Bauteile, z. B. Dächer und Böden der Umgebung, haben dabei eine Referenzkonstruktion. Wenn also die unterschiedlichen Wände berechnet werden, sind alle Dächer und Böden über die entsprechende Referenzkonstruktion definiert.

Die Referenzkonstruktionen sind die folgenden:

- Wand: Zweischalen-Mauerwerk. Werte für Absorption / Albedo Putz: 0.70 / 0.30 (Näherung für Ziegel)
- Dach: Werte für Absorption / Albedo: 0.70 / 0.30 (Näherung für Dachziegel)
- Boden: Werte für Absorption / Albedo: 0.82 / 0.18 (Näherung für gealterten Asphalt).

Alterung und Verschmutzung Materialien

Die Alterung der Materialien, eine Verschmutzung oder ein Ausbleichen werden nicht berücksichtigt. Dies ist auch bei reflektierenden Anstrichen der Fall. In der Literatur lassen sich die folgenden Angaben finden, die eine grobe Abschätzung ermöglichen:

- Reflektierende Anstriche: Gemäss einem Test von 69 möglichen Wandanstrichen mit reflektierenden Eigenschaften (Cool Colors), beträgt der Verlust der Albedo nach 12 Monaten bei keinem Material mehr als 10 %. Für 65 der 69 Wandanstriche liegt der Verlust unter 5 % [40].
- Whitetopping für Strassen: Angaben zur Alterung. Neuer Beton: Albedo 0.35-0.40, gealterter Beton: Albedo 0.20-0.30 [41] (Zeitraum Untersuchung bis 1.5 Jahre [42]).
- Reflektierender Asphalt: Angaben zur Alterung. Nach 6 Monaten war die Albedo um fast 50 % von 0.33 auf 0.17 reduziert. Mittels einer aktiven Reinigung mit Wasser konnte der ursprüngliche Wert wiederhergestellt werden. [43]

Da nach den derzeitigen Kenntnissen der Verfasser keine Norm vorliegt, die Testverfahren für eine frühzeitige Alterung für reflektierende Materialien berücksichtigt, ist unklar, wie sich das Alterungsverhalten über die Jahre entwickelt und ob es nach einigen Jahren zu einer Sättigung kommt. Wenn dies nicht der Fall ist, dann ist die Lebensdauer des Materials damit kurz. Wie sich die Alterung auf die simulierten reflektierenden Materialien auswirkt, kann auf Basis der vorhandenen Daten nicht genau gesagt werden. Als sehr grobe Näherung für einen möglichen Alterungsprozess kann verglichen werden, wie sich die PET verändert, wenn für Materialien (z. B. in der Gruppe VA) unterschiedliche Farbtöne berechnet wurden. Ein Sprung zwischen den drei

Farbkategorien (hell, mittel und dunkel) kann bei Fassaden eine Zunahme der PET zwischen 0.6 und 2.4 K bewirken. Umgekehrt gilt dies auch für ein mögliches Ausbleichen der Materialien (Abnahme PET).

Trockene und feuchte Begrünung (Boden, Wand und Dach)

Alle Begrünungen werden in trockenem und feuchtem Zustand simuliert.

- Trockener Zustand: Da die in den Simulationen ausgewertete Periode am Ende einer Hitzewelle liegt, sind die oberen Schichten des Bodens, der Wände und der Dächer ausgetrocknet. Unter den gewählten Einstellungen im Simulationsprogramm (und auch in der Realität [6]) ist der Verdunstungseffekt der Begrünung damit nicht mehr vorhanden.
- Feuchter Zustand: die Begrünungen haben immer ausreichend Wasser zur Verfügung. Dies gilt auch für die Vorlaufperiode der Simulation. Der Verdunstungseffekt ist damit vorhanden.

6.2.2 Klima, Betrachtungszeitraum und ausgewertete Grössen

Für die Simulation werden die Wetterdaten einer Hitzewelle in Basel in der ersten Augustwoche 2018 verwendet (Basel-Binningen, Quelle MeteoSchweiz). Es wird eine Folge von vier Tagen (01. – 04.08.2018) mit hohen Aussentemperaturen (θ_a) und wolkenlosem Himmel betrachtet. Am vierten Tag mit den höchsten θ_a werden zwei Zeitpunkte (04:00 Uhr und 14:00 Uhr) mit dem Tagesmaximum und dem Tagesminimum analysiert: um 14:00 Uhr liegt die Aussenlufttemperatur θ_a bei 34.8 °C, um 04:00 Uhr liegt sie bei 21.2 °C. Ausgewertet werden θ_a und PET (physiological equivalent temperature).

6.2.3 Betrachteter Ausschnitt

Das für die Simulationen modellierte Areal stellt eine Hofsituation in der Stadt Basel dar (Abb. 56). Dieses weist nachts einen Wärmeinseleffekt zwischen 3 und 4 K auf (Abb. 57).



Abb. 56 Ausschnitt Hofsituation, Quelle: <https://map.geo.bs.ch>



Abb. 57 Klimaanalysekarte Basel Stadt, Ist-Situation
Wärmeinseleffekt Nachts 04:00 Uhr, Quelle: <https://map.geo.bs.ch>, Grundlagen [44]

Der Modellausschnitt bildet einen Bereich mit den Abmessungen von ca. 100 x 100 m ab (Abb. 58). Die Gebäude sind ca. 20 m hoch (vier Stockwerke inkl. halbe Höhe des Schrägdaches). Der Hof und die Strasse enthalten im Modell keine Bäume. Die Platzierung der Sensoren, mit welchen die Simulationsergebnisse ausgewertet werden, zeigt Abb. 59. Die Sensoren 1 - 10 sind von den Fassaden jeweils 1 m entfernt, oder in der Mitte der Strasse bzw. des Hofes platziert. Ihre Höhe beträgt 1.7 und 10.7 m (1.7 m = Person, 10.7 m = Höhe Fenster für Nachtlüftung). Die Sensoren 11 – 16 für das Dach liegen auf einer Höhe von 21.6 m (1.6 m über der Dachebene). Die Rasterweite des Modells beträgt 1.5 m.



Abb. 58 Abmessungen des Modells, Quelle: <https://map.geo.bs.ch>.

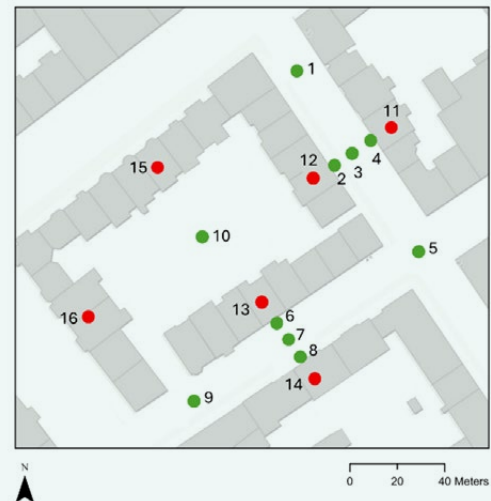


Abb. 59 Platzierung der Sensoren, Quelle: <https://map.geo.bs.ch>.

6.2.4 Dächer

Dachform

Die Geometrie von ENVI-met Modellen beruht auf Quadern. Damit kann ENVI-met keine geneigten Ebenen (z. B. Dächer) berücksichtigen. Es gibt zwar grundsätzlich die Möglichkeit, eine geneigte Ebene durch ein treppenförmiges Aufeinanderstapeln zu nähern, doch dies bedingt ein sehr feines Netz im Modell, welches wiederum zu sehr speicher- und rechenzeitintensiven Modellen führt. Es wird daher vorab an einem vereinfachten Modell einer Strassenschlucht mit 20 m hohen Gebäuden untersucht, ob die Dachform (flach / geneigt) einen signifikanten Einfluss auf die Aussenlufttemperatur im Strassenraum und über dem Dach hat.

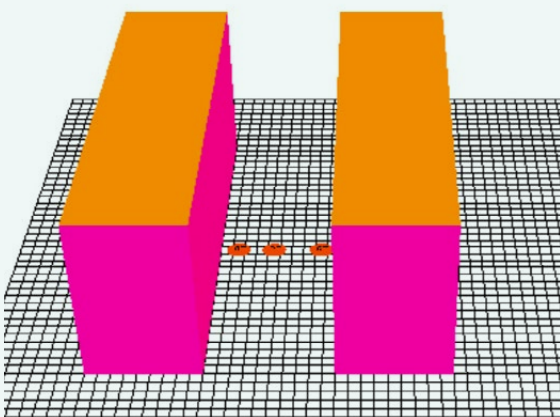


Abb. 60 Simulationsmodell für die Flachdächer

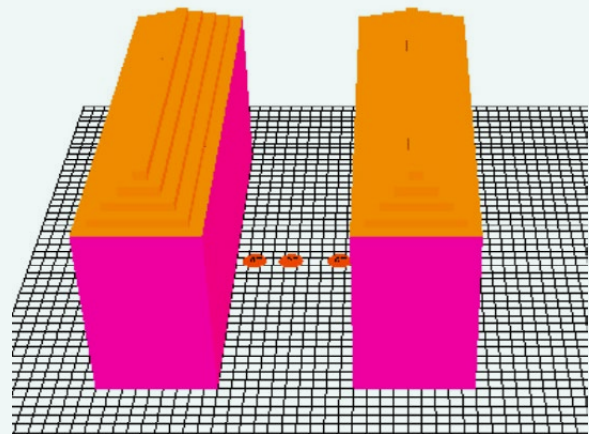


Abb. 61 Simulationsmodell für das Satteldach

Beide an die Strassenschlucht angrenzenden Gebäude werden jeweils mit einem Flachdach und mit einem treppenförmig (Stufengrösse von 1 m, diese muss der Diskretisierung im Modell entsprechen) näherungsweise abgebildeten Satteldach berechnet. Die Dachdeckung wird in

Varianten mit einer Albedo von 0.75 bzw. 0.10 angenommen. Es werden die Randbedingungen gemäss 6.2.2 verwendet. Nachts wird θ_a , tagsüber die MRT anstelle der PET ausgewertet. Die Auswertungsebene für beide Dachformen liegt 1.5 m über dem Scheitelpunkt des Satteldachs, also auf 25.5 m Höhe. Es werden zwei Sensoren in der Mitte der Dächer und drei Sensoren über dem Strassenraum ausgewertet. Weitere Informationen zum Modellaufbau finden sich in [45].

Die Abweichung wird wie folgt berechnet (Formel 3):

$$\text{Abweichung} = ((\text{Flachdach}_x - \text{Satteldach}_x) / \text{Flachdach}_x) * 100 \quad (3)$$

Ergebnisse

Die Untersuchungen bezogen auf die Dachform lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Nachts treten zwischen Sattel- und Flachdach keine nennenswerten Unterschiede der Aussenlufttemperatur auf (maximale Abweichungen von 0.6 % auf 25.5 m Höhe, Sensoren Dachmitte). Die Farbgebung hat keinen Einfluss.
- Tagsüber ergeben sich etwas grössere Unterschiede der MRT zwischen Sattel- und Flachdach. Am deutlichsten sind die Differenzen im Strassenraum auf 25.5 m Höhe (1.1 - 1.8 K, bzw. 4.1 %). Die Farbwahl hat damit einen geringen, aber vernachlässigbaren Einfluss auf die Differenzen. Die Abweichungen sind bei dunkler Farbe höher (Differenz zwischen beiden Abweichungen 1.2 %).

Da nicht alle hier betrachteten Dachdeckungen auf einem Satteldach verwendet werden können, müssten beim Vergleich der Dachmaterialien zwei Dachformen eingesetzt werden. Für den Vergleich der Dachmaterialien untereinander ist das nicht optimal. Zusätzlich müsste für einen einheitlichen Vergleich die Bezugsebene auf 25.5 m festgelegt werden (5.5 m über der Flachdachebene). Daher wird nochmals explizit die Dachform bezogen auf die Farbgebung betrachtet:

- Die Differenzen bei der MRT zwischen heller und dunkler Farbe unterschieden je nach Dachform sind ähnlich. Sie liegen im Mittel über alle fünf betrachteten Sensoren auf der Ebene 25.5 m beim Flachdach bei 5.0 K und beim Satteldach bei 4.8 K. Im Strassenraum sind auf dieser Höhe beim Flachdach die Temperaturen gleichmässiger verteilt (Differenz zwischen den Sensoren 0.2 K) als beim Satteldach (Differenz 1 K).

Weitere Informationen zu den Ergebnissen finden sich in [45].

Fazit

Da im Materialkatalog aus allen Sensoren ein Mittelwert gebildet wird, scheint es nicht sinnvoll zwischen Sattel- und Flachdächern zu differenzieren.

Es ergeben sich die folgenden Konsequenzen für die Modellbildung zur Untersuchung der Dachmaterialien:

- Alle Materialien werden auf Flachdächern untersucht (auch die hinterlüfteten Konstruktionen).
- Steildachkonstruktionen, d. h. hinterlüftete Konstruktionen werden, auch wenn sie im Modell als Flachdach abgebildet werden, im Aufbau nicht verändert.
- Die Temperaturen werden 1.6 m über der Dachebene ausgewertet (21.6 m).

6.2.5 Umgebung Modell

Das eigentliche Modell wird in ENVI-met in eine grössere Umgebung eingebettet, die den räumlichen Kontext darstellt. Da es sich um einen städtischen Kontext handelt, wird die Albedo von Ziegeldächern angenommen (0.3).

6.2.6 Startbedingungen für die Simulation

Das Programm errechnet mit Eingabewerten (Tabelle 14) und mit dem ersten Zeitschritt der Klimadaten das Verhalten der Modellumgebung. Für den Wind wird mit diversen Zwischenrechnungen sichergestellt, eine realistische Ausgangsverteilung der Wirbel zu erhalten, da sich diese erst nach einige Sekunden Simulationszeit entwickeln. Mit diesem Zwischenschritt erfolgt die Neuberechnung der Turbulenzverteilung, die nun den Ausgang für die eigentliche Simulation der Windverhältnisse bildet. Alle anderen Variablen werden integriert, bis sich ein stationärer Zustand eingestellt hat. Dann startet die instationäre Rechnung und damit die eigentliche Simulation. Die Werte in Tabelle 14 verändern sich also ab der ersten berechneten Stunde. Genauere Angaben zum Initialisierungsprozess finden sich in [46].

Tabelle 14 Verwendete ENVI-met Initialisierungsparameter der Simulationen. Bodenfeuchte: Angabe als relative Feuchte [47]

Parameter	Wert
Potenzielle Temperatur der Atmosphäre	21.0 °C
Spezifische Feuchte in einer Höhe von 2'500 m	7 g Wasser / kg Luft
Relative Feuchte in 2 m über Grund	50 %
Rauhigkeitslänge z0 (Windprofil)	0.1 m
Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund	1.4 m
Windrichtung	140°
Bodentemperatur Schicht 0-20 cm	19.9 °C
Bodentemperatur Schicht 20-50 cm	19.9 °C
Bodentemperatur Schicht > 50 cm	19.9 °C
Bodenfeuchte Schicht 0-20 cm	Aussen
Bodenfeuchte Schicht 20-50 cm	75 %
Bodenfeuchte Schicht > 50 cm	75 %
Raumlufttemperatur Gebäude	19.9 °C

6.3 Literaturrecherche zu hellen und dunklen Bodenbelägen

6.3.1 Methodik

Zur Validierung der Auswirkung von hellen und dunklen Bodenmaterialien auf das Stadt- und Mikroklima wird eine Literaturstudie durchgeführt. Dabei werden in einer strukturierten Literaturrecherche 3956 Studien identifiziert. Nach weiteren Filterungen werden davon 377 Studien gesichtet und 36 ausgewertet. Diese Studien werden wie folgt unterteilt:

- Messungen (Tabelle 15: # 1 – 16)
- Simulationen, die mit Messungen validiert sind (Tabelle 15: # 17 – 23)
- Simulationen (Tabelle 15: # 24 – 36)

Der Schwerpunkt der Literaturrecherche liegt auf a) und b). Innerhalb dieser Gruppen werden die Studien nach dem Köppen Klima [26] sortiert.

6.3.2 Ergebnisse

Die Sortierung der Literatur zu hellen und dunklen Bodenbelägen nach dem Köppen Klima in Tabelle 15 zeigt, dass das Untersuchungsgebiet der Mehrzahl der Publikationen (40 %) in einem temperierten, warmen und feuchten Klima (Cf) liegt. In derselben Kategorie wie Deutschland oder die Schweiz, Cfb, mit warmen Sommern sind die Untersuchungsgebiete von vier Publikationen. 26 % der Studien werden in einem temperierten, warmen Klima mit trockenen Sommern (Cs) durchgeführt und 11 % der Studien in einem temperierten, warmen Klima mit trockenen Wintern (Cw). Die restlichen Studien verteilen sich auf Regenwaldklima (Af, 9 %), Steppenklima (Bs, 9 %) und Schneeklima (6 %).

Eine Betrachtung der Wirkung unterschiedlicher Oberflächenreflexionsgrade auf die Temperatur lässt erwarten, dass helle Böden tagsüber einen grösseren Anteil der kurzwelligen Strahlung reflektieren und sich somit weniger stark aufheizen als dunkle Böden. Daher sind die Oberflächentemperatur und die Aussenlufttemperatur θ_a über hellen Böden tiefer als auf bzw. über dunklen Böden. Für die Oberflächentemperatur bestätigen dies 8 Studien (7: Kat. a); 1: Kat. b), Tabelle 15). Für θ_a bestätigen dies 12 Studien (9: Kat. a); 2: Kat. b); 1: Kat. c)). Zwei Studien messen allerdings einen höheren Wert für θ_a und zwei weitere Studien messen sowohl einen höheren als auch einen tieferen Wert für θ_a (alle in Kat. a)).

Eine erhöhte Reflexion von kurzweiliger Strahlung durch helle Böden bewirkt eine erhöhte MRT und dadurch einen Anstieg der PET. Es ist also möglich, dass sich der thermische Komfort über hellen Böden verschlechtert. Eine Rolle spielt dabei auch die Helligkeit der umgebenden Gebäudefassaden. Wie Tabelle 15 zeigt, finden sechs Studien eine Erhöhung der MRT bei hellen Bodenflächen (fünf Kat. a); eine Kat. b)), eine Studie misst eine tiefere MRT und eine Studie misst beides (beide Kat. a)). Bei der PET stellen 22 Studien eine Erhöhung (Verschlechterung) über hellen Böden fest (vier Kat. a); sechs Kat. b); 12: Kat. c)). Drei weitere Studien aus Kat. a) erwähnen als qualitativen Rückschluss, dass eine Verschlechterung der PET eintreten kann, ohne dies mit Zahlen zu belegen. Eine Senkung, d. h. Verbesserung der PET stellen vier Studien fest (drei Kat. a); eine Kat. c)).

Aus der Literaturstudie ergeben sich weitere Erkenntnisse:

- Helle Oberflächen auf Dächern eignen sich, um den Wärmeinseleffekt zu mindern, da Dächer meist nicht zum Aufenthalt von Menschen konzipiert sind und damit der thermische Komfort nicht relevant ist (z. B. [48], [49]).
- Strassenschluchten mit hoher Reflexion können durch Mehrfachreflexion den Klimakältebedarf erhöhen (z. B. [50])
- In [51] wird beschrieben, dass die Kombination von hellen Strassen und dunklen Fassaden im Bereich des Erdgeschosses vorteilhaft für den thermischen Komfort ist.
- Nachts stellen vier Studien (drei Kat. a); eine Kat. b)) in Strassenschluchten keine Reduktion der Aussenlufttemperatur durch helle Strassenbeläge fest, eine Studie (Kat. a)) sieht eine solche Reduktion.
- Eine Befragung zum thermischen Komfort im Aussenbereich (Plätze) zeigt, [52], dass bei dunklen Oberflächen die Toleranz von Passanten für hohe Temperaturen geringer ist.
- Eine Verbesserung des thermischen Komforts ist am wirkungsvollsten mit einer Beschattung durch Bäume zu erreichen (z. B. [53], [54], [55], [56], [57], [58]).

Tabelle 15 Ergebnisse Literaturstudie zur Auswirkung von Bodenbelägen mit unterschiedlichem Reflexionsgrad. Verwendete Abkürzungen: EFH = Einfamilienhäuser; HH = Hochhäuser; KK = Köppen Klima; M = Messung (mindestens θ_a , optional auch Ts_f, RH, Wind, MRT, Strahlung), MFH = Mehrfamilienhäuser; Mo = Modell; PA = Park; PL = Platz; S = Simulation, q = qualitativ, St = Stadtstruktur; SS = Strassenschlucht; Ts_f = Oberflächentemperatur, UC = Universitätscampus; (V) Messergebnisse werden ausgewiesen und zur Validierung einer Simulation verwendet; (v) Messergebnisse werden nicht ausgewiesen, aber die Simulationen wurden mittels Messungen validiert.

#	KK	Ort	Kontext	M	S	helle Böden senken die		helle Böden erhöhen die		Lit.
						Ts _f	θ_a	MRT	PET	
1	Af	Singapur, SGP	SS	x	x		ja		nein	[59]
2	Bsk	Lubbock, USA	UC	x			ja	ja		[60]
3	Bsk	Lhasa, Tibet	St, MFH/EFH	x			ja	nein	nein	[55]
4	Cfa	Thessaloniki, GRC	PL	x				ja	ja	[61]
5	Cfa	Hong Kong, HKG	UC	x	x		ja	nein		[62]
	Cfa	Hong Kong, HKG	UC	x	x			ja		
6	Cfa	Nanjing, CHN	St, HH	x	x	ja	ja		nein	[63]
7	Cfa	Nanning, CHN	Mo, HH	x		ja	ja		Ja (q)	[64]
8	Cfa	Jangyu-dong, KOR	P/S	x			nein	ja	ja	[65]
9	Cfb	Loja, ECU	PA	x		ja	ja			[66]
	Cfb	Loja, ECU	PA	x			nein			
10	Cfb	London, GBR	SS	x	x				ja	[51]
11	Csa	Covina, USA	St, MFH/EFH	x		ja	ja		Ja (q)	[67]
12	Csa	Athen, GRC	St	x	x	ja	ja			[68]
13	Csb	Pacoima, USA	Strasse	x		ja	ja	ja		[49]
14	Cwa	Guangzhou CHN	St, PL; PA	x			*			[52]
15	Cwa	Mianyang, CHN	UC	x		ja	nein	ja	ja	[56]
16	Dfa	Chicago, USA	St, MFH/EFH	x			nein		Ja (q)	[48]
	Dfa	Chicago, USA	St, MFH/EFH	x			ja			
17	Cfa	Shanghai, CHN	St, HH	(V)	x		ja	ja	ja	[57]
18	Cfa	Hangzhou, CHN	SS	(V)	x				ja	[69]
19	Cfb	Amsterdam, NLD	SS	(V)	x				ja	[70]
20	Csa	Athens, GRC	St, MFH/EFH	(V)	x	ja	ja			[71]
21	Csa	Tehran, IRN	PL	(V)	x				ja	[54]
22	Csa	Davis, USA	offen	(V)	x				ja	[72]
23	Cwa	Uttarakhand, IND	SS	(V)	x				ja	[53]
24	Af	Kuala Lumpur, MYS	St, HH	(v)	x				ja	[73]
25	Af	Bedok, SGP	St, MFH/EFH	(v)	x				ja	[74]
26	Bsh, Bsk	Shiraz, IRN	St, HH		x				ja	[75]
27	Cfa	Mailand, ITA	St		x				ja	[76]

#	KK	Ort	Kontext	M	S	helle Böden senken die		helle Böden erhöhen die		Lit.
						Tsf	θ_a	MRT	PET	
28	Cfa	Hong Kong, HKG	St, HH	(v)	x				ja	[58]
29	Cfa	New York, USA	St, HH		x				ja	[77]
30	Cfb	Santa Catarina, BRA	St	(v)	x				ja	[78]
31	Csa	Sevilla, ESP	St	(v)	x				ja	[79]
32	Csa	Rom, ITA	PL		x				nein	[80]
33	Csa	Malaga, ESP	St, HH		x				ja	[81]
34	Cwa	Jinan, CHN	PL	(v)	x				ja	[82]
35	Dfb	Toronto, CAN	PL		x		ja		ja	[83]
36	k. A.	Divers	SS		x				ja	[84]

6.4 Kritische Diskussion Simulationsergebnisse für das städtische Mikroklima

6.4.1 Bodenmaterialien

Ergebnisse

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse für die Aussenlufttemperatur (θ_a) am 04.08.2018 um 4:00 Uhr morgens und um 14:00 Uhr nachmittags, sowie die PET am 04.08.2018 um 14:00 Uhr über den Böden. Die Ergebnisse gelten für die in Kapitel 6.2 genannten Randbedingungen und Modellanordnung.

Der obere Teil von Tabelle 16 zeigt die Auswirkung trockener Bodenbeläge auf die Aussenlufttemperatur (θ_a) in 1.7 m Höhe. Die Bodenbeläge «Albedo 10 %» und «Albedo 80 %» stellen hypothetische Beläge mit einer sehr dunklen und einer sehr hellen Oberfläche dar (sie sind nicht Bestandteil des Materialkatalogs).

Für die trockenen Bodenmaterialien werden die folgenden Beobachtungen gemacht:

- PET: Um 14:00 Uhr führt das hochreflektierende «Whitetopping auf Asphalt» (Albedo: 0.62) zu der höchsten PET, die tiefste PET wird über dem dunklen «Asphalt_d» (Albedo: 0.18) festgestellt. Es ergibt sich über alle Oberflächen ein $\Delta_{\max}$ von 1.0 K. Über dem ausgetrockneten Rasen beträgt die PET 38.2 °C.
- θ_a : um 14:00 Uhr führt «Asphalt_d» zu einem um 0.3 K höheren Wert von θ_a als «Whitetopping auf Asphalt» ($\Delta_{\max}$: 0.4 K). Nachts liegt θ_a auf einer Höhe von 1.7 m um 0.4 K auseinander, auf einer Höhe von 10.7 m sind es 0.1 K.

Tabelle 16 Bodenmaterialien: Ergebnisse für die Aussenlufttemperatur um 04:00 Uhr und die PET um 14:00 Uhr des 04.08.2018 auf einer Höhe von 1.7 m. Farbcode: rot = höchster Wert innerhalb der Untergruppe, blau = tiefster Wert innerhalb der Untergruppe.

	Material	PET @14 Uhr, 1.7 m	θ_a @ 14 Uhr, 1.7 m	θ_a @ 4 Uhr, 1.7 m
Bodenmaterialien	Albedo_10_ %	37.4	35.1	22.9
	Albedo_80_ %	39.0	34.7	22.8
	B_Chaussierung	38.2	35.2	22.7
	B_Rasen	37.9	35.1	22.6
	B_Kiesbelag	38.2	35.1	22.7
	B_Whitetopping_auf_Asphalt	38.5	34.8	22.8
	B_Asphalt_h	37.9	35.0	22.9
	B_Asphalt_d	37.6	35.1	22.9
	B_Steinplattenpflasterung	38.2	34.9	22.9
	B_Betonsteinpflasterung	37.7	35.0	22.9
	B_Betonbelag	37.9	34.9	22.9
	B_Rasengittersteinpflasterung	38.2	35.1	22.7
	B_Rasen_trocken	37.9	35.1	22.6
	B_Rasen_feucht	35.4	34.2	22.4
	B_Rasen_trocken_Bäume_Boden_org_Anteil	34.5	34.3	22.4
	B_Rasen_trocken_Bäume_Boden_min_Anteil	35.4	34.7	22.5
	B_Rasen_trocken_Boden_org_Anteil	36.9	34.6	22.5
	B_Rasen_trocken_Boden_min_Anteil	38.0	35.1	22.6
	B_Rasen_feucht_Bäume_Boden_org_Anteil	33.4	34.0	22.3
	B_Rasen_feucht_Bäume_Boden_min_Anteil	33.4	34.0	22.3
	B_Rasen_feucht_Boden_org_Anteil	35.5	34.3	22.4
	B_Rasen_feucht_Boden_min_Anteil	35.4	34.2	22.4
	B_Wiese_trocken_Bäume_Boden_org_Anteil	34.4	34.3	22.3
	B_Wiese_trocken_Bäume_Boden_min_Anteil	35.3	34.7	22.5
	B_Wiese_trocken_Boden_org_Anteil	36.8	34.6	22.5
	B_Wiese_trocken_Boden_min_Anteil	37.9	35.1	22.6
	B_Wiese_feucht_Bäume_Boden_org_Anteil	33.3	34.0	22.3
	B_Wiese_feucht_Bäume_Boden_min_Anteil	33.3	34.0	22.3
	B_Wiese_feucht_Boden_org_Anteil	35.4	34.3	22.4
	B_Wiese_feucht_Boden_min_Anteil	35.4	34.2	22.4

Der untere Teil von Tabelle 16 zeigt wie sich unterschiedliche Erdreicharten (ein eher leichter Boden mit erhöhtem organischem Anteil und ein eher schwerer Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil) mit Rasen in trockenem und feuchtem Zustand sowie mit und ohne Beschattung durch Bäume auf die PET auswirken. Generell führen unbeschattete Böden zu einer höheren PET als beschattete Böden.

- PET: Die höchste PET wird über dem trockenen Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil festgestellt, die tiefste PET über dem feuchten, beschatteten Boden mit erhöhtem organischem Anteil. Bei derselben Bodenart führen immer die feuchten Böden zu einer tieferen PET. Es ergibt sich ein $\Delta_{\max}$ von 4.6 K.
- θ_a : die Rangfolge um 14:00 Uhr ist ähnlich wie bei der PET ($\Delta_{\max}$: 1.1 K). Nachts um 04:00 Uhr tritt ein $\Delta_{\max}$ von 0.3 K auf.

Diskussion helle und dunkle Oberflächen

Bei Betrachtung der (trockenen) Bodenmaterialien fällt zunächst auf, dass über hellen Materialien eine höhere PET festzustellen ist als über dunkleren Materialien. Die Werte für θ_a liegen über hellen Bodenbelägen tiefer als über dunklen Bodenbelägen. In die Berechnung der PET gehen u.a. die MRT, θ_a , die RH und die Windgeschwindigkeit ein. Die Grösse mit dem räumlich verteilt breitesten Wertebereich zu einem Zeitpunkt tagsüber ist die MRT. Dies zeigt Abb. 62 mit θ_a und

MRT über dem dunklen Belag «Albedo 10 %» und über dem hellen Belag «Albedo 80 %» um 14:00 Uhr.

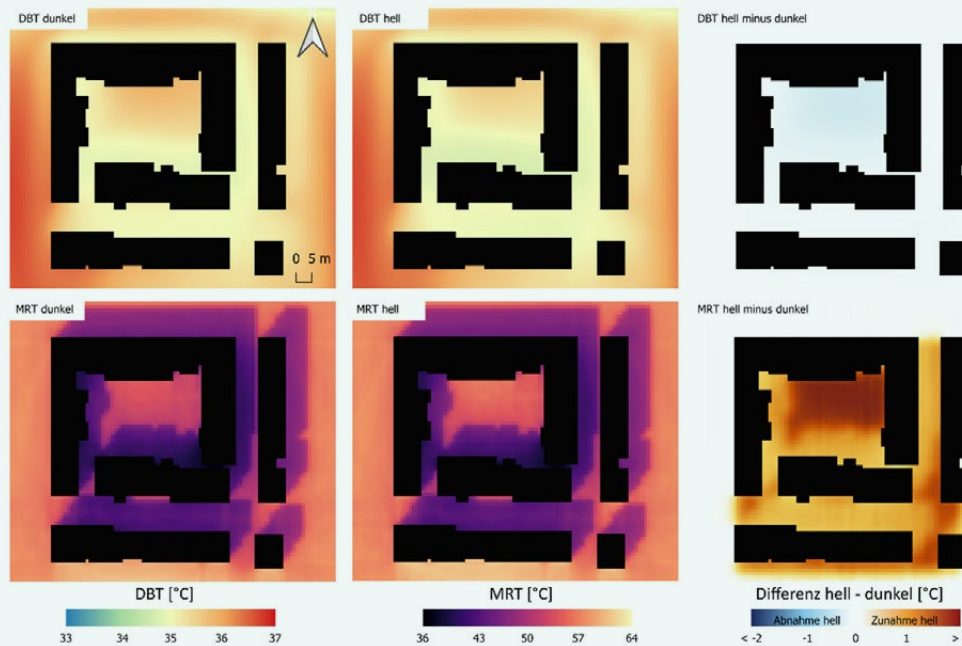


Abb. 62 θ_a (DBT) und MRT für die Bodenbeläge «Albedo 10 %» und «Albedo 80 %» um 14:00 Uhr, in 1.6 m Höhe. Die Bodenbeläge werden bis zum äusseren Rand der Gebäude variiert.

Werden beispielhaft die genannten in die PET eingehenden Werte um jeweils 10 % erhöht, verändert sich die PET wie folgt:

- MRT (Bezug 52.6 auf 57.9 °C): Anstieg PET um 4.6 %,
- θ_a (35.2 auf 38.7 °C): Anstieg um 4.4 %,
- RH (32 auf 35 %): Anstieg um 0.4 %,
- Windgeschwindigkeit (0.9 auf 1.0 m/s): Senkung um -0.3 %.

Ein Anstieg der MRT macht also bei der Bewertung der PET einen deutlichen Unterschied aus und kann durch die leicht tiefere θ_a über den hellen Böden offensichtlich nicht kompensiert werden.

Zur weiteren Veranschaulichung der Auswirkung unterschiedlicher Reflexionsgrade wird zur Auswertung der Beläge «Albedo 10 %» und «Albedo 80 %» eine Bilanz erstellt. Diese vereinfachte Energiebilanz (Q^* , kWh/m²) einer Oberfläche besteht aus der jeweiligen Strahlungs- und Wärmebilanz (Formel 4).

$$\downarrow SW - SW \uparrow + \downarrow LW - LW \uparrow = Q^* = Q_H + Q_G + Q_L \quad (4)$$

Dabei sind bei der Strahlungsbilanz SW die kurzwellige Strahlung und LW die langwellige Strahlung. Die Pfeile geben jeweils die Reflexion (für SW) und die Gegenstrahlung für (LW) an. Bei der Wärmebilanz sind Q_H die sensible Wärme, Q_G der Bodenwärmestrom und Q_L die latente Wärme. Damit die Energiebilanz aufgeht, ist in Q^* noch ein Speicherterm enthalten.

Die Tagessumme zwischen 05:00 Uhr und 20:00 Uhr der Energiebilanz zeigt Abb. 63 und Abb. 65 zeigt die Nachtsumme zwischen 21:00 und 04:00 Uhr für «Albedo 10 %». Abb. 64 und Abb. 66 zeigen die Strahlungsbilanz für den hellen Belag «Albedo 80 %». Die Schliessungslücke der Tagessummen entfällt auf den Speicherterm, der nicht dargestellt ist. Es zeigt sich, dass tagsüber (Abb. 65) vom hellen Belag deutlich mehr kurzwellige Strahlung (SW) reflektiert wird als beim dunklen Belag (Abb. 63). Dies erhöht die PET bei Verwendung des Belages «Albedo 80 %» um 1.6 K (14:00 Uhr). Der dunkle Belag speichert mehr Wärme ein und gibt diese als sensible Wärme ab, dies erhöht den Wert von θ_a bei «Albedo 10 %» tagsüber um 0.4 K (14:00 Uhr, Abb. 62),

nachts um 0.1 K (04:00 Uhr, Abb. 65 und Abb. 66). Die Ergebnisse der Simulation, dass der thermische Komfort bei hellen Böden tiefer ist als bei dunklen Böden, kann also durch die Analyse der Strahlungsbilanz erklärt werden. Entscheidend ist dabei, dass bei der PET die auf den Menschen einwirkenden Strahlungsflüsse berücksichtigt werden. Durch die an der Erdoberfläche reflektierte solare Strahlung wird beim hellen Material zwar die Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche verringert, die auf den Menschen einwirkende Strahlung wird jedoch erhöht. Die Simulationsergebnisse werden auch durch die Ergebnisse anderer auf Messungen und Simulationen basierenden Forschungsprojekte aus Kapitel 6.3.2 bestätigt.

In welchem Mass die helle Farbgebung den thermischen Komfort beeinträchtigt, hängt auch von der Umgebung ab. Sind beispielsweise in einer besonnten Strassenschlucht auch die Hauswände reflektierend, steigt der Anteil der kurzwelligen reflektierten Strahlung weiter [70], [84] und der thermische Komfort verschlechtert sich zusätzlich. In [51] wird als eine für den thermischen Komfort günstige Kombination ein heller Strassenbelag in Kombination mit dunklen Fassaden im Bereich des Erdgeschosses angegeben. Die unzweifelhaft vorteilhafte (und bei einem reinen Anstrich auch kostengünstige) Auswirkung von hellen Dachflächen auf den Wärmeinseleffekt (Bezug: Oberflächen- und Lufttemperatur) ist daher nicht einfach auf Bodenflächen zu übertragen [49]. Bei der Gestaltung von Bodenflächen ist immer zu bedenken, ob der thermische Komfort von Menschen berücksichtigt werden muss.

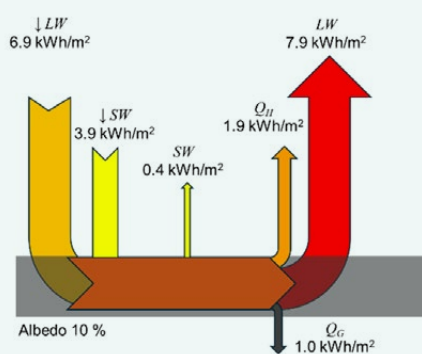


Abb. 63 Strahlungsbilanz «Albedo 10 %» von 5:00 bis 20:00 Uhr 04.08. Randbedingungen siehe Kap. 2.2 und 2.3. Anmerkung: der Unterschied der Summe $LW \downarrow$ zu Bild 5 ist auf Reflektionen zurückzuführen. $Q_L = 0$.
Verwendete Abkürzungen: LW: Langwellige Strahlung; SW: kurzwellige Strahlung; QH: Sensible Wärme, QG: Sensible Wärme oberste Bodenschicht; $\downarrow$: abwärts

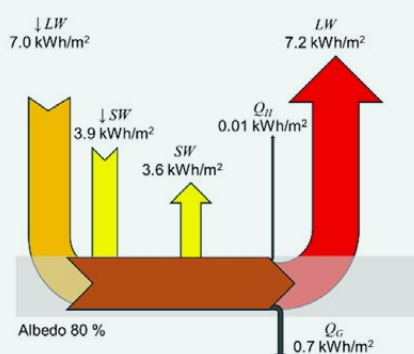


Abb. 64 Strahlungsbilanz «Albedo 80 %» von 5:00 bis 20:00 Uhr

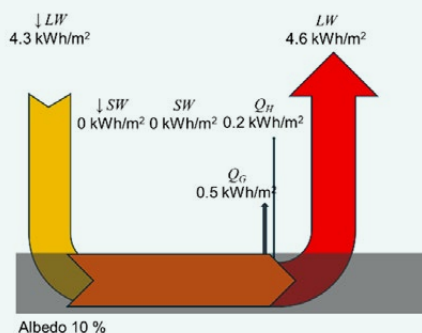


Abb. 65 Strahlungsbilanz «Albedo 10 %» von 21:00 bis 4:00 Uhr.

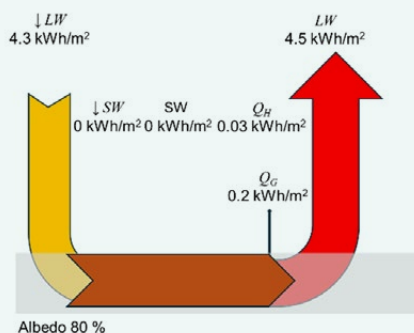


Abb. 66 Strahlungsbilanz «Albedo 80 %» von 21:00 bis 4:00 Uhr

Betrachtet man $\Delta\theta_a$ um 14:00 Uhr 1.7 m über den trockenen Bodenbelägen aus Tabelle 16, so ergibt sich ein Wert von 0.4 K. Dies sind eher geringe Differenzen. Vergleicht man die Asphaltbeläge, so treten bei einem ΔAlbedo von 0.15 (B_Aspphalt_h und B_Aspphalt_d mit Albedo 0.33 bzw. 0.18), bzw. 0.44 (B_Whitetopping_auf_Aspphalt und B_Aspphalt_d mit Albedo 0.62 bzw. 0.18) Werte von $\Delta\theta_a = 0.1$ K bzw. $\Delta\theta_a = 0.3$ K auf. Werte aus der Literatur geben für ΔAlbedo 0.18 – 0.23 gemessene Werte für $\Delta\theta_a$ zwischen 0.0 K und 0.4 K ([61], [70], [83], [49]). Damit liegen die Simulationen im Bereich anderweitig berichteter Ergebnisse.

Diskussion Begrünung Boden

Beim Vergleich der Bodenarten mit Rasen weist der Boden mit erhöhtem organischem Anteil in allen Zuständen tiefere Temperaturen auf als der Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil (Vergleich gleicher Zustände, z. B. trocken, beschattet: $\Delta\theta_{a,\max}$ 0.5 K). Diese Tendenz wird auch in einer Literaturquelle berichtet [85]. Beim Vergleich von feuchtem und trockenem Bodenzustand sowie von Verschattung und Besonnung zeigt es sich, dass beim mit Bäumen beschatteten Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil die Differenzen zwischen trocken und feucht grösser sind als beim Boden mit erhöhtem organischem Anteil, z. B. ΔPET Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil 2.0 K ($\Delta\theta_a = 0.73$ K), ΔPET Boden mit erhöhtem organischem Anteil 1.1 K, ($\Delta\theta_a = 0.32$ K). Ohne Schatten sind die Differenzen nochmals grösser (z. B. ΔPET Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil 2.6 K ($\Delta\theta_a = 0.87$ K), ΔPET Boden mit erhöhtem organischem Anteil 1.5 K ($\Delta\theta_a = 0.38$ K)). In der Literatur sind für die Differenz zwischen bewässertem und trockenem Rasen gemessene Werte für $\Delta\theta_a$ zwischen 0.24 bis 2.0 K zu finden [86], [87]. Betrachtet man klimatisch ähnliche Orte, dann sind die Werte aus [88] mit $\Delta\theta_a = 0.24$ K bis $\Delta\theta_a = 0.65$ K tieferen Temperaturen durch Bewässerung von Grünflächen als Vergleichsbasis geeignet. Diese Werte zeigen mit den eigenen Werten für $\Delta\theta_a$ zwischen 0.32 K und 0.87 K eine gute Übereinstimmung. Der Vergleich von «B_Aspphalt_d» mit trockenem (B_Rasen_trocken_Boden_min_Anteil und B_Rasen_trocken_Boden_org_Anteil), sowie feuchtem, besonntem Rasen (B_Rasen_feucht_Boden_org_Anteil und B_Rasen_feucht_Boden_min_Anteil), zeigt für $\theta_{a,\max}$ um 0.2 K bis 0.8 K tiefere, für die $\text{PET}_{\max}$ um 0.10 K bis 2.1 K tiefere Werte über dem Rasen. In der Literatur wird für Rasenflächen (ohne Angabe des Feuchtezustandes) im Vergleich zu Asphalt eine um bis zu 0.15 - 1.1 K höhere $\theta_{a,\max}$ über dem Asphalt angegeben [89], [90]. Eigene Messungen [91] zeigen für $\theta_{a,\max}$ über dem feuchten Rasen um bis zu 1.3 K tiefere Werte im Vergleich zu Betonsteinen ($\text{PET}_{\max}$ 0.40 – 2.4 K). Über dem trockenen Rasen kann $\theta_{a,\max}$ um bis zu 1.5 K höher liegen ($\text{PET}_{\max}$ lag 0.3 K höher, oder 0.3 K tiefer als die Betonsteine).

Validierung Bodentemperatur

Die untersuchten Konstruktionen für den Boden führen bei den Ergebnissen für die PET nur zu Streuungen innerhalb einer schmalen Bandbreite von 0.4 K. Es ist anzunehmen, dass die thermische Masse des Bodens grössere Differenzen verhindert. Zusätzlich wird die resultierende PET auch stark von der solaren Einstrahlung und dem Wind beeinflusst.

Zu Beginn der Simulation hat der Boden eine Temperatur von 19.9 °C (Tabelle 14). Am Ende des Simulationszeitraums (letzte Stunde) liegt die Temperaturspanne im gesamten Areal zwischen 19.9 °C und 26.6 °C (Tiefe 35 cm, Bodentyp: Referenz mit $\alpha = 0.18$). Diese Werte können mit verfügbaren Messdaten der Bodentemperaturen in zwei Ortschaften (Tiefe: 35 cm, ländliche, unbebaute Gegend, 01.08.2018) nahe bei Basel verglichen werden [92]: In Brislach und Therwil wurden 20.5 °C und 21.4 °C gemessen. Der tiefere Wert der Simulationsergebnisse zeigt somit eine gute Übereinstimmung mit den Messresultaten. Wenn man den städtischen Kontext des Simulationsszenarios berücksichtigt, dann ist auch der höhere Wert der Bandbreite plausibel.

6.4.2 Wandmaterialien

Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse für die Aussenlufttemperatur (θ_a) am 04.08.2018 um 4:00 Uhr morgens und um 14:00 Uhr nachmittags, sowie die PET am 04.08.2018 um 14:00 Uhr für die Fassaden. Die Ergebnisse gelten für die in Kapitel 6.2 genannten Randbedingungen und Modellanordnung.

Tabelle 17 Wandmaterialien: Ergebnisse für die Aussentemperatur um 04:00 Uhr und die PET um 14:00 Uhr des 04.08.2018 auf einer Höhe von 1.7 m. Farbcode: rot = höchster Wert innerhalb der Untergruppe, blau = tiefster Wert innerhalb der Untergruppe. Simulationsergebnisse, die mit Zurückhaltung interpretiert werden müssen, haben eine graue Schriftfarbe.

	Material	PET @14 Uhr, 1.7 m	θ_a @ 14 Uhr, 1.7 m	θ_a @ 4 Uhr, 1.7 m
Wandmaterialien	Reflektierender_Anstrich_d	38.1	35.1	22.7
	Reflektierender_Anstrich_m	39.5	35.0	22.6
	Reflektierender_Anstrich_h	40.3	34.9	22.5
	HF_Begrünungselement_trocken	38.2	36.3	22.4
	HF_Begrünungselement_feucht	34.6	33.9	21.4
	HF_Steinverkleidung	37.0	34.9	22.9
	HF_Faserzementverkleidung_d	35.3	34.3	22.9
	HF_Faserzementverkleidung_m	36.4	34.4	22.9
	HF_Faserzementverkleidung_h	38.7	34.5	22.9
	HF_Faserzementverkleidung	37.7	34.4	22.9
	HF_Metallblechverkleidung_d	33.5	33.9	22.8
	HF_Metallblechverkleidung_h	36.9	34.0	22.5
	HF_Metallblechverkleidung_b	35.0	33.9	22.6
	HF_Photovoltaik	35.8	34.7	22.7
	HF_Holzverkleidung	37.4	34.9	22.6
	LB_Sandwichpaneel_d	33.5	33.9	22.8
	LB_Sandwichpaneel_h	37.0	34.0	22.6
	LB_Sandwichpaneel_b	37.6	34.2	22.7
	LB_Glasfassade_Sonnenschutz_h	36.0	33.6	22.0
	LB_Glasfassade_Sonnenschutz_d	32.3	33.3	22.0
	LB_Glasfassade	38.3	35.7	22.1
	VA_Kompaktfassade_Steinwolle_d	37.9	35.2	22.7
	VA_Kompaktfassade_Steinwolle_m	38.6	35.2	22.7
	VA_Kompaktfassade_Steinwolle_h	40.1	35.0	22.6
	VA_Kompaktfassade_EPS_d	36.9	34.9	23.1
	VA_Kompaktfassade_EPS_m	37.7	34.9	23.1
	VA_Kompaktfassade_EPS_h	39.5	34.8	22.9
	VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz_d	38.6	35.4	22.3
	VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz_m	39.2	35.4	22.3
	VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Aerogeldämmputz_h	40.6	35.2	22.2
	VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Dämmputz_d	38.3	35.3	22.4
	VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Dämmputz_m	38.9	35.3	22.4
	VA_Einschalenbacksteinmauerwerk_Dämmputz_h	40.4	35.1	22.3
	ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschrift_d	38.0	35.3	22.9
	ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschrift_m	38.6	35.2	22.9
	ZW_Zweischalenmauerwerk_Luftschrift_h	40.2	35.0	22.7
	ZW_Zweischalenmauerwerk_Kerndämmung	38.6	35.0	22.8
	ZW_Sichtbetonwand_Kerndämmung	37.3	34.8	22.9

Verhalten von dunklen und hellen Wandoberflächen

Das Verhalten von dunklen und hellen Wandoberflächen wird exemplarisch anhand von den Simulationsergebnissen für Sensor Nummer 10 diskutiert, da dieser Sensor zu den betrachteten Zeiten nicht durch umgebende Gebäude verschattet wird.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass bei einer Veränderung der Farbe eines Materials die dunklere Farbgebung zu höheren Oberflächen- und damit Aussenlufttemperaturen führt (Materialien # 5 und 6 in Tabelle 18). Da dunkle Materialien jedoch weniger kurzwellige Strahlung reflektieren als helle, ist eine höhere PET in der Umgebung von hellen Materialien zu erwarten.

Bei einigen Wandkonstruktionen ruft die helle Farbgebung einen geringfügig höheren Wert für θ_a hervor als die dunkle Farbe. Die Konstruktionen, bei denen dies auftritt, sind die Metallverkleidungen und die Faserzementverkleidung (# 1 – 4 in Tabelle 18). Mit Ausnahme des Faserzements bestehen die Konstruktionen aus einer Metallschicht in Verbindung mit einer Dämmung oder einer Luftschicht. Die thermische Trägheit der Konstruktionen ist also gering. Die Analyse der Temperaturen zeigt, dass die Bodenoberfläche (bei allen Varianten # 1 – 6 mit einer Albedo von 0.3) bei den hellen Metallen und der hellen Faserzementverkleidung eine um bis zu 1.8 K höhere Temperatur aufweist als bei den dunklen Fassadenfarben. Dies kann durch die erhöhte Reflexion kurzwelliger Strahlung von der Fassade an den Boden erklärt werden.

Die höhere Bodentemperatur wirkt sich auch auf die Lufttemperatur in bodennahen Schichten aus (Rezeptor 10 Differenz zur hellen Farbgebung -0.2 bis -0.4 K, Ergebnis und Definition Differenz siehe Tabelle 18). Bei den übrigen Konstruktionen, wie z. B. # 5 und 6 Tabelle 18 ist die Bodenoberfläche bei hellen Fassaden zwar auch wärmer als bei dunklen, insgesamt ist die Differenz mit 0.8 K aber kleiner

Die Ergebnisse für θ_a bei hellen Metallwänden und dem hellen Faserzement sind damit vorsichtig zu bewerten, da sie nicht unbedingt auf andere Situationen (insbesondere mit anderen Albedo-Werten für den Boden) zu übertragen sind. Die Grundaussage der PET ändert sich dadurch nicht, da hier die Strahlungstemperatur dominiert. Die Strahlungstemperatur in 1.7 m Höhe ist bei den hellen Farbgebungen bis zu 6.3 K höher.

Tabelle 18 PET Rezeptor 10 (Mitte Innenhof), Temperaturen und Windgeschwindigkeit um 14:00 Uhr im Innenhof (Die Differenzen Δ sind jeweils als $\Delta x = x_{\text{hell}} - x_{\text{dunkel}}$ definiert).

#	Material	Albedo	PET (°C) 1.7 m	MRT (°C) 1.7 m	θ_a (°C) 1.7 m	T Oberfläche Boden (°C) 0.0 m	Windgeschwin- digkeit (m/s), 1.7 m
1	* LB_Sandwich- paneel_h / _d	0.68 / 0.08 (Δ 0.61)	44.4 / 40.8	51.2 / 45.3 (Δ 5.9)	34.7 / 34.5 (Δ = 0.2)	44.4 / 42.8 (Δ 1.6)	0.09 / 0.09
2	* LB_Glasfassade_ Sonnenschutz_h / _d	0.68 / 0.08 (Δ 0.61)	43.5 / 39.7	49.9 / 43.6 (Δ 6.3)	34.4 / 34.0 (Δ = 0.4)	44.0 / 42.2 (Δ 1.8)	0.09 / 0.09
3	* HF_Metallblechver- kleidung_h / _d	0.68 / 0.08 (Δ 0.61)	44.3 / 40.8	51.2 / 45.3 (Δ 5.9)	34.7 / 34.4 (Δ = 0.3)	44.4 / 42.8 (Δ 1.6)	0.09 / 0.09
4	* HF_Faserzement- verkleidung_h / _d	0.75 / 0.26 (Δ 0.49)	46.1 / 42.7	53.9 / 48.2 (Δ 5.7)	35.1 / 34.8 (Δ = 0.3)	45.2 / 43.7 (Δ 1.5)	0.09 / 0.09
5	Reflektierender_ Anstrich_h / _d	0.81 / 0.42 (Δ 0.39)	47.7 / 45.6	56.3 / 52.7 (Δ 3.6)	35.5 / 35.5 (Δ = 0.0)	45.8 / 45.0 (Δ 0.8)	0.09 / 0.09
6	VA_Einschalenback- steinmauerwerk_ Dämmputz_h / _d	0.75 / 0.26 (Δ 0.49)	47.7 / 45.8	56.2 / 52.9 (Δ 3.3)	35.6 / 35.7 (Δ = -0.1)	45.9 / 45.1 (Δ 0.8)	0.09 / 0.09

Hinterlüftete Wandkonstruktionen

Wie in Kapitel 6.2.1 erwähnt, behandelt ENVI-met die Luftschicht vereinfachend wie eine Dämmschicht ($\lambda = 0.025 \text{ W (m K)}^{-1}$).

Unter der Prämisse, dass in der Realität die Hinterlüftung wirksam ist, sollte die Aussenschicht von Konstruktionen tiefere Temperaturen aufweisen als zum Beispiel die äusserste Schicht von verputzten Aussendämmungen. Speziell nachts ist dieser Unterschied zu erwarten, da die Luftschicht ja durch den Auftrieb natürlich belüftet wird und somit die äusserste Schicht «temperiert» wird.

Die Simulationsergebnisse passen zur genannten Vereinfachung: die höchsten Temperaturen nachts für alle Wände zeigen sich bei den Materialien «W_VA_Bet_EPS_d» und «_m» mit 23.1°C . In der Gruppe mit den hinterlüfteten Materialien treten allerdings bei fünf Materialien (von insgesamt zwölf) Werte von 22.9°C auf («HF_Faserzementverkleidung», «_d», «_m», «_h» und «HF_Steinverkleidung»). Die Simulationsergebnisse für diese Konstruktionstypen stellen also den schlechtesten Fall mit einer unterbundenen Hinterlüftung dar.

6.4.3 Dachmaterialien

Ergebnisse

Die Auswirkungen von Dachmaterialien auf den Strassenraum zeigt Tabelle 19 anhand der Ergebnisse für die Aussenlufttemperatur (θ_a) am 04.08.2018 um 4:00 Uhr morgens und um 14:00 Uhr nachmittags, sowie die PET am 04.08.2018 um 14:00 Uhr 1.7 m über der Strassenebene. Über dem Dach wird nur θ_a in 1.6 m über der Dachebene ausgewertet, nicht aber die PET, da die Dächer (ausser ggf. die Gründächer) nicht zum Aufenthalt von Menschen konzipiert sind und damit der thermische Komfort nicht relevant ist. Die Ergebnisse gelten für die in Kapitel 6.2 genannten Randbedingungen und Modellanordnung.

Auf die Aussenlufttemperaturen im Strassenraum wirken sich die unterschiedlichen Dachmaterialien nur begrenzt aus. Die Differenz bei θ_a und der PET beträgt zwischen dem Material, das die höchsten ($D_{\text{Bitumendichtung}}$) und demjenigen, das die tiefsten Temperaturen verursacht ($D_{\text{Metalldeckung_h}}$) jeweils 0.3 K (aufgerundet) (aufgerundet). Über dem Dach ist folgendes feststellbar:

- Tag: Der höchste Wert von θ_a wird um 14:00 Uhr über dem Nacktdach mit Bitumendichtung ermittelt, das beispielsweise in der Schweiz nicht mehr zugelassen ist. Der tiefste Wert für θ_a wird über Dachbegrünungen in feuchtem Zustand festgestellt (Δ_{max} : 0.7 K).
- Nacht: Die Aussenlufttemperatur über den hinterlüfteten Dachmaterialien liegt zwischen 33.6 und 33.8°C , die Materialien D_{Bitumen} und D_{Kies} rufen beide eine θ_a von 34.2°C hervor und θ_a über den Grün- und Solardächern liegt zwischen 33.5 und 33.9 K . Zwischen dem Dachmaterial, das die höchste θ_a hervorruft (D_{Bitumen}) und den feuchten, ganz begrünten Flachdächern beträgt Δ_{max} 0.7 .

Tabelle 19 Dachmaterialien: Ergebnisse für die Aussentemperatur um 04:00 Uhr und die PET um 14:00 Uhr des 04.08.2018 auf einer Höhe von 1.7 m. Farbcode: rot = höchster Wert innerhalb der Untergruppe, blau = tiefster Wert innerhalb der Untergruppe.

Material	PET @14 Uhr, 1.7 m	θ_a @ 14 Uhr, 1.7 m	θ_a @ 4 Uhr, 1.7 m	θ_a @ 14 Uhr, 21.6 m	θ_a @ 4 Uhr, 21.6 m
D_Ziegeldeckung_d	37.4	34.9	22.8	33.8	22.4
D_Ziegeldeckung_m	37.4	34.9	22.8	33.8	22.4
D_Metallddeckung_d	37.4	34.9	22.8	33.7	22.4
D_Metallddeckung_h	37.4	34.9	22.8	33.6	22.3
D_Metallddeckung_b	37.4	34.9	22.8	33.7	22.3
D_Faserzement	37.4	34.9	22.8	33.8	22.4
D_Faserzement_d	37.4	34.9	22.8	33.8	22.4
D_Faserzement_m	37.4	34.9	22.8	33.8	22.4
D_Faserzement_h	37.4	34.9	22.8	33.7	22.4
D_Bitumendichtung	37.6	35.1	22.9	34.2	22.2
D_Kiesdeckung	37.6	35.1	22.8	34.2	22.2
D_Extensiv_Begrünung_trocken	37.3	34.9	22.7	33.7	21.8
D_Extensiv_Begrünung_feucht	37.3	34.8	22.7	33.5	21.8
D_Intensiv_Begrünung_trocken	37.3	34.8	22.7	33.6	21.7
D_Intensiv_Begrünung_feucht	37.3	34.8	22.7	33.5	21.7
D_Solar	37.4	34.9	22.8	33.8	22.4
D_Photovoltaik_Extensiv_Begrünung_trocken	37.5	35.0	22.8	33.9	22.1
D_Photovoltaik_Extensiv_Begrünung_feucht	37.5	35.0	22.8	33.8	22.1

Diskussion begrünte und unbegrünte Dächer

Für die Dächer können in der Literatur gemessene und simulierte Vergleichswerte für begrünte und nicht begrünte Dächer gefunden werden ([89], [93], [94], [95]). Dabei wird die Temperatur auf etwa 1.7 m Höhe über der Strasse verglichen. Bei den eigenen Simulationen werden die Konstruktion «D_Bitumendichtung» und Mittelwerte aus «D_Extensiv_Begrünung_trocken» und «_feucht», sowie «D_Intensiv_Begrünung_trocken» und «_feucht» verglichen. Für ΔPET und $\Delta \theta_a$ ergibt sich jeweils eine Senkung durch die begrünten Dächer um 0.3 K. In der Literatur werden Werte für $\Delta \theta_a$ zwischen 0 und 0.9 K angegeben. Damit sind die eigenen Werte realistisch. Auch bei den Dächern gilt, dass eine feuchte Dachbegrünung tiefere Temperaturen aufweist als eine ausgetrocknete Begrünung, dies wird auch durch Messungen bestätigt [96].

6.4.4 Raumlufttemperatur im Gebäude

Die Simulationen konzentrieren sich auf das Mikroklima ausserhalb der Gebäude. Obwohl bei den meisten der untersuchten Konstruktionen das Innenklima der Gebäude vom Aussenklima durch eine Dämmschicht entkoppelt ist und damit die Aussentemperatur der Wand nicht signifikant beeinflusst, ist es aus Plausibilitätsgründen wünschenswert, dass die Raumlufttemperaturen realistisch sind. Die Starttemperatur innen (θ_i) liegt bei 19.9 °C (Tabelle 14). Vereinfachend behandelt ENVI-met jeden Gebäudeblock als eine hohle Einheit ohne thermische Masse (wie z. B. Trennwände, Böden etc.). Zusätzlich werden Belüftung und solare Gewinne nicht berücksichtigt. Eine exemplarische Überprüfung der Raumlufttemperatur in einem Gebäudeblock (Abb. 59, U-förmige Blockbebauung, die den Innenhof mit Rezeptor 10 umgibt) zeigt, dass θ_i am Ende der Simulationsperiode 26.5 °C beträgt. Dieses Resultat ist plausibel.

6.4.5 Streuung Ergebnisse im betrachteten Ausschnitt

In den vorangehenden Auswertungen wird jeweils der Mittelwert der zehn definierten Rezeptoren analysiert (Verteilung Rezeptoren siehe Abb. 59). Die Streuung zwischen den Rezeptoren kann durch die Standardabweichung und die Differenz zwischen dem Minimal- und Maximalwert für die PET oder θ_a für jedes Material beschrieben werden. Im Folgenden wird aus jeder Gruppe das Material mit der höchsten und tiefsten PET bzw. θ_a betrachtet (Tabelle 20).

Bei Böden und Fassaden ist jeweils die Streuung und ΔPET bei dem Material mit der höheren PET grösser. Bei den Böden liegt die Standardabweichung zwischen 2.2 K und 3.8 K, bei den Fassaden liegt sie zwischen 2.8 und 4.2 K. ΔPET liegt für die Böden zwischen 6.8 K und 11.9 K, für die Fassaden zwischen 9.9 und 11.8 K.

Angeichts der Verteilung der Rezeptoren und der Tatsache, dass die Besonnungs- und Verschattungssituation unterschiedlich ist, sind diese Werte realistisch.

Beim Dach ist die Streuung für θ_a mit 0.1 K deutlich kleiner. Die maximale Temperaturdifferenz liegt zwischen 0.5 und 0.6 K.

Bei allen Materialien ist die Streuung von θ_a während der Nacht mit einer Standardabweichung zwischen 0.0 K und 0.2 K deutlich kleiner.

Tabelle 20 Standardabweichung für die PET und θ_a und die Differenzen der Minimal- und Maximalwerte für die Sensoren.

Material	Standard- abweichung PET 14:00 Uhr (K)	Standard- abweichung θ_a 14:00 Uhr (K)	Standard- abweichung θ_a 04:00 Uhr (K)	ΔPET (14:00 Uhr) (K)	$\Delta \theta_a$ (14:00 Uhr) (K)
LB_Glasfassade_Sonnenschutz_d	2.8	n.a.	0.0	9.9	n.a.
VA_Einschalenmauerwerk - Aerogeldämmputz_h	4.2	n.a.	0.1	11.8	n.a.
B_Wiese_feucht_Bäume_Boden_ org_Anteil	2.2	n.a.	0.2	6.8	n.a.
B_Chaussierung	3.8	n.a.	0.2	11.9	n.a.
D_Intensiv_feucht	n.a.	0.1	0.2	n.a.	0.5
D_Bitumen	n.a.	0.1	0.2	n.a.	0.6

7 Anhang 3: Literatur

Anmerkung: Die Datenquellen für die Datensammlung in Kapitel 4 sind direkt im jeweiligen Unterkapitel für jedes Material separat angegeben.

- [1] M. Ecklin, *Diese Gemeinde macht Ernst: Hier ist Rasen sprengen verboten*, bz Basel, Basel, 2018.
- [2] N. L. Landolt, *Erste Bewässerungsverbote in Aargauer Gemeinden: «Es geht nicht mehr anders»*, Aargauer Zeitung, Aargau, 2018.
- [3] R. Tratschin, V. Bozzini, C. Dübendorfer, and E. Hirt, *Trockenheit im Sommer 2022 – Befragung der kantonalen Gewässerschutz- und Fischereifachstellen zu Auswirkungen und Massnahmen*, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Berlin, New York, 2023. [Online]. Available: www.ebp.ch
- [4] BAFU, *Boden in der Schweiz. Zustand und Entwicklung*. Stand 2017. Bern, 2017.
- [5] M. Stucki, S. Wettstein, A. Mathis, and S. Amrein, *Erweiterung der Studie «Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich»: Eigenschaften, Verfügbarkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Auswirkungen*, Zürich, 2019. [Online]. Available: <https://www.zhaw.ch/iunr/lca>
- [6] M. A. Rahman et al., *Comparative analysis of shade and underlying surfaces on cooling effect*, Urban For Urban Green, vol. 63, no. June, 2021, doi: 10.1016/j.ufug.2021.127223.
- [7] Stadt Zürich (Hrsg.), *Programm Klimaanpassung: Fachplanung Hitzeminderung*, Stadt Zürich, Grün Stadt Zürich, Zürich, 2020.
- [8] N. Pfoser, N. Jenner, J. Henrich, J. Heusinger, and S. Weber, *Gebäude Begrünung Energie*, Bundesministerium für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Berlin, 2013.
- [9] R. A. Spronken-Smith and T. R. Oke, *The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates*, Int J Remote Sens, vol. 19, no. 11, pp. 2085–2104, 1998, doi: 10.1080/014311698214884.
- [10] P. Cohen, O. Potchter, and A. Matzarakis, *Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort*, Build Environ, vol. 51, pp. 285–295, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.11.020.
- [11] S. E. Gill, M. A. Rahman, J. F. Handley, and A. R. Ennos, *Modelling water stress to urban amenity grass in Manchester UK under climate change and its potential impacts in reducing urban cooling*, Urban For Urban Green, vol. 12, no. 3, pp. 350–358, 2013, doi: 10.1016/j.ufug.2013.03.005.
- [12] K. Liu, X. Li, S. Wang, and X. Gao, *Assessing the effects of urban green landscape on urban thermal environment dynamic in a semiarid city by integrated use of airborne data, satellite imagery and land surface model*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 107, p. 102674, 2022, doi: 10.1016/j.jag.2021.102674.
- [13] F. Lindberg, S. Onomoura, and C. S. B. Grimmond, *Influence of ground surface characteristics on the mean radiant temperature in urban areas*, Int J Biometeorol, pp. 1–14, 2016.
- [14] D. Armson, P. Stringer, and A. R. Ennos, *The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area*, Urban For Urban Green, vol. 11, no. 3, pp. 245–255, 2012, doi: 10.1016/j.ufug.2012.05.002.
- [15] M. Ragettli, *Heat-related mortality in Switzerland: Relevance and the effect of heat-health action plans*, in Swiss TPH Winter Symposium, Schweizerisches Tropen- und Public Health Institute, Ed., Basel: Schweizerisches Tropen- und Public Health Institute, 2019.
- [16] Öffentliche Energieberatung Bern-Mittelland, *Photovoltaik – Solarstrom für Ihr Zuhause*, Bern, 2013.
- [17] SIA 180:2014, *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. Schweiz: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, 2014, pp. 1–72.
- [18] H. Taha, D. Sailor, and H. Akbari, *High-Albedo Materials for Reducing Building Cooling Energy Use*, Berkeley, 1992.
- [19] N. L. Alchapar, E. N. Correa, and A. M. Cantón, *Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones*, Energy Build, vol. 69, pp. 22–32, 2014.
- [20] T. R. Oke, M. Gerald, A. Christen, and J. A. Voogt, *Urban Climates*, 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [21] E. Ereil, D. Pearlmutter, and T. Williamson, *Urban Microclimate – Designing the Spaces Between Buildings*, 1st ed. New York: Earthscan, 2011.

- [22] N. Gaitani, I. Burud, T. Thiis, and M. Sanamouris, *High-resolution spectral mapping of urban thermal properties with Unmanned Aerial Vehicles*, Build Environ, vol. 121, pp. 215–224, 2017.
- [23] ASTM, ASTM E1980 – 11(2019): *Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces*. USA, 2019.
- [24] E. Lorenz, M. VanGeem, and J. Feld, *Concrete Construction*, Solar Reflectance for Walls. Accessed: Feb. 26, 2020. [Online]. Available: https://www.concreteconstruction.net/business/management/solar-reflectance-for-walls_o
- [25] SN 592000:2012, *Anlagen für die Liegenschaftsentwässerung – Planung und Ausführung*. Schweiz: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2012, pp. 1–204.
- [26] BNB, *Nutzungsdauern von Bauteilen 2017*, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Berlin, 2017.
- [27] C. Bahr and K. Lennerts, *Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen – Endbericht*, 2010.
- [28] KBOB / ecobau / IBP, *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022*, Version 3. Schweiz, 2022.
- [29] P. O. Fanger, *Thermal Comfort*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [30] C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.
- [31] P. Höppe, *The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment.*, Int J Biometeorol, vol. 43, no. 2, pp. 71–75, 1999.
- [32] H. Mayer and A. Matzarakis, *Die Richtlinie VDI 3787 Blatt 2 «Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Luftthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima»*, in *Umweltsimulation: Methodik, Anwendung, Nutzen*, K. R. der L. im V. und DIN, Ed., Düsseldorf: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, 1999, pp. 53–62.
- [33] E. Walther and Q. Goestchel, *The P.E.T. comfort index: Questioning the model*, Build Environ, vol. 137, no. April, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.054.
- [34] J. Dürr, *Aufbau und Validierung des MCDM-Modells BASK zur Bewertung der Materialisierung von urbanen Oberflächen*, Fachhochschule Nordwestschweiz, 2020.
- [35] S. Roth-Kleyer, *Ressourcenschutz für Vegetationssubstrate: Torfersatzstoffe für den GaLaBau*, Stadt+Grün, pp. 45–50, Apr. 2013.
- [36] L. Eyman, A. Mathis, M. Stucki, and S. Amrein, *Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich: Eigenschaften, Verfügbarkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Auswirkungen*, Zürich, 2015. [Online]. Available: <https://www.zhaw.ch/iunr/lca/>
- [37] C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik – Bau und Energie*, 4th ed. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2014.
- [38] A. Soltani and E. Sharifi, *Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide*, Frontiers of Architectural Research, vol. 6, no. 4, pp. 529–538, 2017, doi: 10.1016/j.foar.2017.08.001.
- [39] T. Sinsel, H. Simon, W. Ouyang, C. dos Santos Gusson, P. Shinzato, and M. Bruse, *Implementation and evaluation of mean radiant temperature schemes in the microclimate model ENVI-met*, Urban Clim, vol. 45, no. October 2021, p. 101279, 2022, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101279.
- [40] R. Levinson, G. Ban-Weiss, P. Berdahl, S. Chen, H. Destailats, and N. Dumas, *Solar-Reflective «Cool» Walls: Benefits, Technologies, and Implementation*, California Energy Commission, 2019.
- [41] M. Santamouris, *Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island – A review of the actual developments*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 26, pp. 224–240, 2013.
- [42] R. Levinson and H. Akbari, *Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete*, 2002. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00835-9.
- [43] G.-E. Kyriakodis and M. Santamouris, *Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates – Results from a large scale urban mitigation project*, Urban Clim, vol. 24, pp. 326–339, 2018.
- [44] C. Burmeister, B. Büter, and P. Trute, *Stadtklimaanalyse Kanton Basel-Stadt 2019 – Grundlagen, Methoden, Ergebnisse (Rev09)*, Basel, 2019.
- [45] C. Hoffmann and A. Geissler, *MaKlim: Materialkatalog für Städte im Klimawandel – Erweiterung (Zwischenbericht)*, Bundesamt für Energie BFE, Muttentz, 2023. doi: 10.26041/fhnw-10159.
- [46] M. Bruse, *Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima – Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-met zur Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen*, Ruhr-Universität Bochum, 1999.

- [47] ENVI_MET – Technical Model Webpage. [Online]. Available: <https://envimet.info/doku.php>
- [48] P. Coseo and L. Larsen, *Cooling the Heat Island in Compact Urban Environments: The Effectiveness of Chicago's Green Alley Program*, *Procedia Eng*, vol. 118, pp. 691–710, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.504.
- [49] A. Middel, V. K. Turner, F. A. Schneider, Y. Zhang, and M. Stiller, *Solar reflective pavements-A policy panacea to heat mitigation?*, *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 6, 2020, doi: 10.1088/1748-9326/ab87d4.
- [50] N. Yaghoobian and J. Kleissl, *Effect of reflective pavements on building energy use*, *Urban Clim*, vol. 2, pp. 25–42, 2012, doi: 10.1016/j.uclim.2012.09.002.
- [51] A. Salvati, M. Kolokotroni, A. Kotopouleas, R. Watkins, R. Giridharan, and M. Nikolopoulou, *Impact of reflective materials on urban canyon albedo, outdoor and indoor microclimates*, *Build Environ*, vol. 207, no. PB, p. 108459, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108459.
- [52] Z. Fang, F. Zhang, Z. Guo, Z. Zheng, and X. Feng, *Investigation into the outdoor thermal comfort on different urban underlying surfaces*, *Urban Clim*, vol. 55, no. November 2023, p. 101911, 2024, doi: 10.1016/j.uclim.2024.101911.
- [53] P. Mohammad, S. Aghlmand, A. Fadaei, S. Gachkar, D. Gachkar, and A. Karimi, *Evaluating the role of the albedo of material and vegetation scenarios along the urban street canyon for improving pedestrian thermal comfort outdoors*, *Urban Clim*, vol. 40, no. April, p. 100993, 2021, doi: 10.1016/j.uclim.2021.100993.
- [54] A. Karimi, H. Sanaieian, H. Farhadi, and S. Norouzian-Maleki, *Evaluation of the thermal indices and thermal comfort improvement by different vegetation species and materials in a medium-sized urban park*, *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1670–1684, 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.06.015.
- [55] L. Chen, Y. Zhang, J. Han, and X. Li, *An investigation of the influence of ground surface properties and shading on outdoor thermal comfort in a high-altitude residential area*, *Frontiers of Architectural Research*, vol. 10, no. 2, pp. 432–446, 2021, doi: 10.1016/j.foar.2020.12.005.
- [56] Z. Huang, Z. Gou, and B. Cheng, *An investigation of outdoor thermal environments with different ground surfaces in the hot summer-cold winter climate region*, *Journal of Building Engineering*, vol. 27, no. October 2019, p. 100994, 2020, doi: 10.1016/j.job.2019.100994.
- [57] F. Yang, S. S. Y. Lau, and F. Qian, *Thermal comfort effects of urban design strategies in high-rise urban environments in a sub-tropical climate*, *Archit Sci Rev*, vol. 54, no. 4, pp. 285–304, 2011, doi: 10.1080/00038628.2011.613646.
- [58] S. Jia and Y. Wang, *Effect of heat mitigation strategies on thermal environment, thermal comfort, and walkability: A case study in Hong Kong*, *Build Environ*, vol. 201, no. January, p. 107988, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107988.
- [59] E. V. S. K. K. Donthu, Y. P. Long, M. P. Wan, M. Zhou, and B. F. Ng, *Dynamics of cool surface performance on urban microclimate: A full-scale experimental study in Singapore*, *Sustain Cities Soc*, vol. 102, no. January, p. 105218, 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105218.
- [60] A. W. Hardin and J. K. Vanos, *The influence of surface type on the absorbed radiation by a human under hot, dry conditions*, *Int J Biometeorol*, vol. 62, no. 2, pp. 43–56, 2018, doi: 10.1007/s00484-017-1477-z.
- [61] A. Chatzidimitriou and S. Yannas, *Microclimate development in open urban spaces: The influence of form and materials*, *Energy Build*, vol. 108, pp. 156–174, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.048.
- [62] T. F. Zhao and K. F. Fong, *Characterization of different heat mitigation strategies in landscape to fight against heat island and improve thermal comfort in hot-humid climate (Part I): Measurement and modelling*, *Sustain Cities Soc*, vol. 32, no. October 2016, pp. 523–531, 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.03.025.
- [63] Y. Tan, C. Li, H. Feng, and J. Yang, *Exploring the Land Cover Material Interaction of Urban Open Space on the Thermal Comfort of Crowds in High-Temperature Environments and Retrofit Strategies: Two Case Studies in the Nanjing Xinjiekou District*, *Land (Basel)*, vol. 13, no. 3, 2024, doi: 10.3390/land13030314.
- [64] Y. Qin, P. Wei, S. jie Wang, and K. Tan, *Experimental study on the thermal characteristics of urban mockups with different paved streets*, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 44, pp. 63008–63016, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-15234-1.
- [65] Y. Il Cho, J. A. Jung, and M. J. Lee, *Use of Unmanned Aerial Vehicles to Explore the Structural Characteristics of Urban Spaces for Outdoor Heat Stress Assessment and Comparative Analysis of Heat Island Cooling Strategies*, *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, vol. 17, pp. 15420–15430, 2024, doi: 10.1109/JSTARS.2024.3451435.

- [66] E. A. Maldonado, S. V. Jaramillo, L. A. Rodríguez, C. B. Arciniega, and S. O. Salazar, *Impact of Unsealed Surface Pavements on Air Temperature and Humidity in Public Spaces*, Proceedings of International Structural Engineering and Construction, vol. 11, no. 1, pp. 1–6, 2024, doi: 10.14455/ISEC.2024.11(1).SUS-06.
- [67] J. Ko, H. Schlaerth, A. Bruce, K. Sanders, and G. Ban-Weiss, *Measuring the impacts of a real-world neighborhood-scale cool pavement deployment on albedo and temperatures in Los Angeles*, Environmental Research Letters, vol. 17, no. 4, 2022, doi: 10.1088/1748-9326/ac58a8.
- [68] V. Lontorfos, C. Efthymiou, and M. Santamouris, *On the time varying mitigation performance of reflective geoengineering technologies in cities*, Renew Energy, vol. 115, pp. 926–930, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.09.033.
- [69] T. Zhang et al., *Optimizing pedestrian thermal comfort in urban street canyons for summer and winter: Tree planting or low-albedo pavements?*, Sustain Cities Soc, vol. 120, no. September 2024, p. 106143, 2025, doi: 10.1016/j.scs.2025.106143.
- [70] P. J. C. Schrijvers, H. J. J. Jonker, S. R. de Roode, and S. Kenjereš, *The effect of using a high-albedo material on the Universal Temperature Climate Index within a street canyon*, Urban Clim, vol. 17, pp. 284–303, 2016, doi: 10.1016/j.uclim.2016.02.005.
- [71] A. Synnefa, T. Karlessi, N. Gaitani, M. Santamouris, D. N. Assimakopoulos, and C. Papakatsikas, *Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate*, Build Environ, vol. 46, no. 1, pp. 38–44, 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.06.014.
- [72] H. Li, *Evaluation of Cool Pavement Strategies for Heat Island Mitigation*, University of California, Davis, 2012.
- [73] T. Haeri, N. Hassan, and A. Ghaffarianhoseini, *Evaluation of microclimate mitigation strategies in a heterogenous street canyon in Kuala Lumpur from outdoor thermal comfort perspective using Envi-met*, Urban Clim, vol. 52, no. September, p. 101719, 2023, doi: 10.1016/j.uclim.2023.101719.
- [74] W. Yang, Y. Lin, and C. Q. Li, *Effects of Landscape Design on Urban Microclimate and Thermal Comfort in Tropical Climate*, Advances in Meteorology, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/2809649.
- [75] O. Ahmadzadeh and R. Vakilinezhad, *Evaluating the effect of urban surfaces albedo on the microclimate and outdoor thermal comfort in hot climate*, International Journal of Environmental Studies, vol. 00, no. 00, pp. 1–25, 2025, doi: 10.1080/00207233.2024.2444834.
- [76] S. Falasca, V. Ciancio, F. Salata, I. Golasi, F. Rosso, and G. Curci, *High albedo materials to counteract heat waves in cities: An assessment of meteorology, buildings energy needs and pedestrian thermal comfort*, Build Environ, vol. 163, no. July, p. 106242, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106242.
- [77] B. H. Lynn et al., *A modification to the NOAA LSM to simulate heat mitigation strategies in the New York City metropolitan area*, J Appl Meteorol Climatol, vol. 48, no. 2, pp. 199–216, 2009, doi: 10.1175/2008JAMC1774.1.
- [78] N. H. Gapski, D. L. Marinoski, A. P. Melo, and S. Guths, *Impact of urban surfaces' solar reflectance on air temperature and radiation flux*, Sustain Cities Soc, vol. 96, no. April, p. 104645, 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104645.
- [79] V. P. Lopez-Cabeza, S. Alzate-Gaviria, E. Diz-Mellado, C. Rivera-Gomez, and C. Galan-Marin, *Albedo influence on the microclimate and thermal comfort of courtyards under Mediterranean hot summer climate conditions*, Sustain Cities Soc, vol. 81, no. December 2021, p. 103872, 2022, doi: 10.1016/j.scs.2022.103872.
- [80] A. Battisti, F. Laureti, M. Zinzi, and G. Volpicelli, *Climate mitigation and adaptation strategies for roofs and pavements: A case study at Sapienza University Campus*, Sustainability (Switzerland), vol. 10, no. 10, 2018, doi: 10.3390/su10103788.
- [81] P. E. Camporeale and P. Mercader-Moyano, *Retrofit strategies to mitigate overheating linking urban climate modeling and urban building simulations with outdoor comfort. An urban sector in Malaga (Spain)*, Energy Build, vol. 298, no. April, p. 113531, 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113531.
- [82] L. Yang, J. Liu, and S. Zhu, *Evaluating the Effects of Different Improvement Strategies for the Outdoor Thermal Environment at a University Campus in the Summer: A Case Study in Northern China*, Buildings, vol. 12, no. 12, 2022, doi: 10.3390/buildings12122254.
- [83] M. Taleghani and U. Berardi, *The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto*, Urban Clim, vol. 24, pp. 449–459, 2018, doi: 10.1016/j.uclim.2017.05.007.
- [84] E. Erell, D. Pearlmutter, D. Boneh, and P. B. Kutiel, *Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons*, Urban Clim, vol. 10, no. P2, pp. 367–386, 2014, doi: 10.1016/j.uclim.2013.10.005.

- [85] B. Stumpe et al., *Soil texture mediates the surface cooling effect of urban and peri-urban green spaces during a drought period in the city area of Hamburg (Germany)*, Science of the Total Environment, vol. 897, no. March, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165228.
- [86] P. Vahmani and T. S. Hogue, *Incorporating an Urban Irrigation Module into the Noah Land Surface Model Coupled with an Urban Canopy Model*, J Hydrometeorol, vol. 15, no. 4, pp. 1440–1456, 2014, doi: 10.1175/jhm-d-13-0121.1.
- [87] J. Yang and Z. H. Wang, *Planning for a sustainable desert city: The potential water buffering capacity of urban green infrastructure*, Landsc Urban Plan, vol. 167, no. January, pp. 339–347, 2017, doi: 10.1016/j.landurbplan.2017.07.014.
- [88] P. K. Cheung, S. J. Livesley, and K. A. Nice, *Estimating the cooling potential of irrigating green spaces in 100 global cities with arid, temperate or continental climates*, Sustain Cities Soc, vol. 71, no. April, p. 102974, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.102974.
- [89] S. Tsoka, A. Tsikaloudaki, and T. Theodosiou, *Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications – A review*, Sustain Cities Soc, vol. 43, no. July, pp. 55–76, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.08.009.
- [90] H. Lee, H. Mayer, and L. Chen, *Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany*, Landsc Urban Plan, vol. 148, pp. 37–50, 2016, doi: 10.1016/j.landurbplan.2015.12.004.
- [91] C. Hoffmann, A. Geissler, and A. Wicki, *Differences in microclimate of paved and green areas*, Urban Clim, vol. 64, p. 102595, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.uclim.2025.102595.
- [92] D. Schmutz, *Messnetz Bodenfeuchte Jahresbericht 2018*, Liestal, 2018.
- [93] H. M. Imran, J. Kala, A. W. M. Ng, and S. Muthukumaran, *Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia*, J Clean Prod, vol. 197, pp. 393–405, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.179.
- [94] M. Knaus and D. Haase, *Green roof effects on daytime heat in a prefabricated residential neighbourhood in Berlin, Germany*, Urban For Urban Green, vol. 53, no. September 2019, p. 126738, 2020, doi: 10.1016/j.ufug.2020.126738.
- [95] G. Zhang, B. J. He, Z. Zhu, and B. J. Dewancker, *Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates*, Int J Environ Res Public Health, vol. 16, no. 2, 2019, doi: 10.3390/ijerph16020179.
- [96] W. Nyuk Hien, T. Puay Yok, and C. Yu, *Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate*, Build Environ, vol. 42, no. 1, pp. 25–54, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.030.

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Wohnungswesen BWO
Hallwylstrasse 4, 3003 Bern
Tel. +41 58 480 91 11
info@bwo.admin.ch, www.bwo.admin.ch

Download

www.bwo.admin.ch

Projektpartner

Baugenossenschaft wohnen&mehr, Basel

Autor/innen

Caroline Hoffmann, INEB, FHNW, Caroline.Hoffmann@fhnw.ch
Achim Geissler, INEB, FHNW, Achim.Geissler@fhnw.ch

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Institut Nachhaltigkeit und Energie am Bau
Hofackerstrasse 30
CH-4132 Muttenz
www.fhnw.ch

Fachliche Beratung

Andreas Wicki, GEO Partner AG, Basel

Finanzierung

Bundesamt für Wohnungswesen BWO
Bundesamt für Energie BFE

Gestaltung

Hahn+Zimmermann, Bern

Zitierweise

Caroline Hoffmann, Achim Geissler (2026). *Baumaterialien für Städte im Klimawandel. Materialkatalog mit Empfehlungen, 2. Auflage*. Bundesamt für Wohnungswesen, Bern.

Anmerkungen

Die Zusammenfassung dieses Berichtes ist in deutscher, französischer und italienischer Sprache erhältlich.

Der Bericht gibt die Auffassung der Autorinnen und Autoren wieder, die nicht notwendigerweise mit derjenigen der Auftraggebenden übereinstimmen muss.

Titelbild

© VBS