

Technische Dokumentation

Modellkonzept und Physik

Rieke Ammonit & Chris Reudenbach

2026-04-28

Zweck des Modells

KlimaCheck-Schulhof ist ein vereinfachtes, didaktisches Mikroklima-Modell für Schulhof-Workshops. Das Modell bildet keinen realen Schulhof prognostisch exakt ab. Es dient als **physikalisch plausibles Vergleichsmodell**, mit dem Schülerinnen und Schüler untersuchen können, wie Materialien, Gebäude, Schatten, Vegetation, Dachbegrünung und Fassadenbegrünung die thermische Belastung auf Aufenthaltsflächen verändern.

Der zentrale Einsatzfall ist nicht die Vorhersage absoluter Temperaturen, sondern der Vergleich von Varianten:

- Ausgangszustand gegen Maßnahme
- Asphalt gegen Rasen
- normale Dächer gegen Gründächer
- normale Fassaden gegen begrünte Fassaden
- offene Flächen gegen verschattete oder vegetationsnahe Flächen
- flächige Maßnahmen gegen punktuelle Maßnahmen

Das Modell arbeitet deshalb bewusst mit effektiven, didaktischen Parametern. Viele Größen sind nicht als direkt kalibrierte Messwerte zu lesen, sondern als modellinterne Wirkparameter, die typische physikalische Unterschiede sichtbar machen.

Grundstruktur

Raum

Der Schulhof wird als zweidimensionales Raster aus NetLogo-Patches modelliert. In der aktuellen Version wird die Welt mit folgenden Einstellungen aufgebaut:

Eigenschaft	Wert
x-Koordinaten	-25 bis 25
y-Koordinaten	-25 bis 25
Rastergröße	51 × 51 Patches
Patchgröße in der Anzeige	10
Anzahl Patches	2601

Jeder Patch repräsentiert eine kleine Fläche des Schulhofs. Die tatsächliche reale Kantenlänge eines Patches wird nicht als feste metrische Größe erzwungen. Für die didaktische Interpretation kann ein Patch als Rasterzelle eines vereinfachten Lageplans gelesen werden.

Zeit

Die Modellphysik läuft mit einem festen internen Zeitschritt:

Größe	Wert
interner Zeitschritt	0.25 h
Ausgabeintervall	1 h
Tageslauf	0 bis 24 h
Schulzeit für Hitzelast	07:00 bis 16:00 Uhr

Der interne Zeitschritt von 0.25 h entspricht 15 Minuten. Viele Ausgaben und Protokolle werden nur zu vollen Stunden aktualisiert, die thermische Dynamik wird aber in 15-Minuten-Schritten berechnet.

Zustandslogik

Das Modell unterscheidet drei zentrale Ebenen:

1. **Oberfläche:** Temperatur der Boden-, Dach-, Vegetations- oder Objekt Oberfläche.
2. **Substrat:** vereinfachter Wärmespeicher unter oder hinter der Oberfläche.
3. **bodennahes Luftfeld:** lokale Lufttemperatur über dem Patch.

Diese Trennung ist didaktisch wichtig. Heiße Oberflächen und warme Luft sind nicht identisch. Asphalt kann deutlich heißer werden als die Luft darüber. Die Luft reagiert verzögert und wird zusätzlich durch Mischung, Wind, Vegetation und Fassaden beeinflusst.

Patch-Semantik

Jeder Patch besitzt zwei getrennte semantische Eigenschaften:

Variable	Bedeutung
ground-kind	Bodenklasse des Patches
object-kind	Objekt auf dem Patch
roof-style	Dachtyp bei Gebäuden
wall-style	Wandtyp bei Gebäuden

Diese Trennung verhindert, dass ein Baum einfach als grüner Boden behandelt wird. Ein Baum ist ein Objekt mit Schattenwurf, Vegetationshöhe und Verdunstung. Ein Gebäude ist ein Objekt mit Dach, Wand, Höhe, Schatten und Fassadenwirkung.

Bodenklassen

Die Bodenklassen sind:

- Asphalt
- Pflaster
- Offenpflaster
- Sand
- Sportbelag
- Rasen
- none

none wird für Gebäudepatches verwendet, weil dort keine begehbare Bodenfläche modelliert wird.

Objektklassen

Die Objektklassen sind:

- none
- building
- tree
- hedge

Gebäude besitzen eine Höhe, einen Dachstil und einen Wandstil. Bäume und Hecken besitzen eine Vegetationshöhe und werfen Schatten.

Materialparameter

Die Materialparameter werden in `apply-ground-properties`, `apply-effective-roof-properties`, `apply-tree-properties` und `apply-hedge-properties` gesetzt.

Die wichtigsten Parameter sind:

Parameter	Bedeutung
<code>albedo</code>	kurzwelliger Reflexionsanteil
<code>emissivity</code>	langwellige Emissivität
<code>thermal-mass</code>	effektive thermische Trägheit
<code>evap-factor</code>	Verdunstungsfähigkeit

Bodenflächen

Bodenklasse	Albedo	Emissivität	thermische Masse	Verdunstungsfaktor
Asphalt	0.10	0.95	0.58	0.00
Pflaster	0.20	0.94	0.58	0.00
Offenpflaster	0.24	0.95	0.62	0.30
Sand	0.35	0.92	0.40	0.09
Sportbelag	0.14	0.95	0.48	0.00
Rasen	0.26	0.98	0.65	1.00
none	0.00	0.00	0.00	0.00

Die Werte sind effektive Modellparameter. Asphalt ist dunkel und ohne Verdunstung. Pflaster ist heller als Asphalt, aber ebenfalls trocken. Offenpflaster erhält einen kleinen Verdunstungsanteil. Rasen erhält eine starke Verdunstungsfähigkeit, bleibt aber wasserlimitiert.

Dächer

Dachtyp	Albedo	Emissivität	thermische Masse	Verdunstungsfaktor
normales Dach	0.10	0.93	0.35	0.00
Gründach	0.22	0.96	0.38	0.30

Das normale Dach wird als dunkles Bitumendach behandelt. Das Gründach wird als extensives Gründach modelliert: kühler als Bitumen, aber flacher, trockener und weniger leistungsfähig als bodengebundener Rasen.

Vegetation

Objekt	Albedo	Emissivität	thermische Masse	Verdunstungsfaktor
Baum	0.18	0.98	0.32	1.15
Hecke	0.18	0.97	0.30	1.10

Bäume und Hecken wirken nicht nur über Materialparameter. Sie wirken zusätzlich über Schattenwurf, Vegetationsnähe, Wasserhaushalt und geringere direkte Strahlungsbelastung.

Wasserhaushalt

Der Wasserhaushalt wird über einen einfachen Speicher pro Patch abgebildet. Die Funktion `set-water-bucket` setzt drei Größen:

Größe	Bedeutung
<code>water-store-max</code>	maximale Wasserspeicherkapazität
<code>wetness-factor</code>	Wirksamkeit feuchter Oberfläche
<code>water-store</code>	aktueller Wasserspeicher

Die Anfangsfüllung wird als Anteil der maximalen Speicherkapazität gesetzt.

Wasserspeicherparameter

Fläche/Objekt	Maximaler Speicher	Feuchtefaktor	Anfangsfüllung
normales Dach	0.05	0.01	0.00
Gründach	10.0	0.65	0.70
Baum	30.0	1.00	0.80
Hecke	20.0	0.90	0.80
Asphalt	0.02	0.01	0.00
Pflaster	0.10	0.03	0.05
Offenpflaster	2.5	0.20	0.20

Fläche/Objekt	Maximaler Speicher	Feuchtefaktor	Anfangsfüllung
Sand	1.00	0.06	0.10
Sportbelag	0.02	0.01	0.00
Rasen	24.0	0.80	0.70

Die Speicherwerte sind didaktische Effektivwerte. Sie steuern, ob ein Patch Verdunstung liefern kann. Trockene, versiegelte Materialien erhalten praktisch keinen wirksamen Speicher.

Nachlieferung aus tieferem Boden

Die Modellversion enthält eine vereinfachte stündliche Nachlieferung für Vegetationsflächen:

Fläche/Objekt	Nachlieferung pro Stunde
Rasen	0.03
Baum	0.05
Hecke	0.04

Die Nachlieferung wird zusätzlich mit dem freien Speicherraum skaliert. Ist der Speicher voll, wird nichts nachgefüllt. Ist er leer, ist die Nachlieferung maximal.

Meteorologischer Antrieb

Der meteorologische Tagesgang wird in `update-solar-geometry` erzeugt. Das Modell nutzt drei Jahreszeiten: Sommer, Frühling/Herbst und Winter.

Jahreszeitliche Parameter

Jahreszeit	Tageslänge	maximale Sonnenhöhe	mittlere Lufttemperatur	Tagesamplitude	Stunde des Maximums	maximale Kurzwellige Strahlung	Tiefen- temperatur
Sommer	14 h	60°	25 °C	7 K	16 Uhr	850	24 °C
Frühling/Herbst	11 h	45°	16 °C	7 K	15 Uhr	680	15 °C
Winter	8 h	22°	5 °C	5 K	14 Uhr	320	4 °C

Sonnenaufgang und Sonnenuntergang

Aus der Tageslänge werden Sonnenaufgang und Sonnenuntergang berechnet:

$$t_{\text{rise}} = 12 - \frac{\text{daylight}}{2}$$

$$t_{\text{set}} = 12 + \frac{\text{daylight}}{2}$$

Außerhalb dieses Zeitraums ist der solare Antrieb null.

Sonnenfaktor

Während des Tages wird die relative Tagesposition berechnet:

$$p = \frac{t - t_{\text{rise}}}{\text{daylight}}$$

Der Sonnenfaktor folgt einer Sinuskurve:

$$S = \max(0, \sin(180^\circ \cdot p))$$

In NetLogo werden trigonometrische Funktionen mit Gradwerten verwendet. Der Sonnenfaktor ist eine dimensionslose Größe zwischen 0 und 1.

Sonnenhöhe und Azimut

Die Sonnenhöhe wird aus dem Sonnenfaktor abgeleitet:

$$\alpha = \alpha_{\text{max}} \cdot S$$

Der Sonnenazimut läuft vereinfacht von 90° bis 270° :

$$A = 90^\circ + 180^\circ \cdot p$$

Das ist keine astronomisch exakte Sonnenstandsberechnung, sondern eine vereinfachte didaktische Tagesbahn.

Hintergrundlufttemperatur

Die Hintergrundlufttemperatur wird als asymmetrischer Tagesgang berechnet:

$$\phi = 360^\circ \cdot \frac{t - t_{\max}}{24}$$

$$B = 0.82 \cos(\phi) + 0.18 \cos(2\phi - 35^\circ)$$

$$T_{\text{air}} = T_{\text{mean}} + A_T \cdot B$$

Der zweite Cosinus-Term verhindert einen vollständig symmetrischen Tagesgang. Dadurch fällt die Temperatur am Nachmittag und Abend nicht exakt spiegelbildlich zum Vormittag.

Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte wird ebenfalls als Tagesgang gesetzt:

Jahreszeit	mittlere relative Feuchte	Amplitude
Sommer	58 %	16
Frühling/Herbst	68 %	14
Winter	78 %	10

Die Formel lautet:

$$RH = \max \left(25, \min \left(95, RH_{\text{mean}} + RH_{\text{amp}} \cos \left(360^\circ \cdot \frac{t - 5}{24} \right) \right) \right)$$

Abgeleitete räumliche Felder

Vor jedem thermischen Update werden mehrere räumliche Kontextfelder neu berechnet:

- Vegetationseinfluss
- Wandkontext
- räumliche Einfassung

Diese Felder werden nicht direkt eingezeichnet, beeinflussen aber Temperatur, Hitzelast und Luftaustausch.

Vegetationseinfluss

Der Vegetationseinfluss *veg_nearby* wird aus nahen Bäumen und Hecken berechnet. Dafür werden Radien von 1.5 und 3.5 Patches genutzt.

$$I_{\text{tree}} = 0.55 \cdot N_{\text{tree},1.5} + 0.18 \cdot N_{\text{tree},3.5}$$

$$I_{\text{hedge}} = 0.35 \cdot N_{\text{hedge},1.5} + 0.12 \cdot N_{\text{hedge},3.5}$$

$$\text{veg_nearby} = \min \left(1, \frac{I_{\text{tree}} + I_{\text{hedge}}}{2.2} \right)$$

Vegetation wirkt dadurch nicht nur auf dem Patch selbst, sondern auch in der Umgebung. Bäume werden stärker gewichtet als Hecken.

Wandkontext

Der Wandkontext wird für Nicht-Gebäudepatches berechnet. Direkt angrenzende Gebäude über *neighbors4* erzeugen volle Fassadenwirkung. Gebäudekanten im Radius 2 erzeugen eine abgeschwächte Nahbereichswirkung.

Direkt an Gebäuden:

$$\text{wall_exposure} = \min \left(1, \frac{N_{\text{adjacent buildings}}}{2} \right)$$

Im Nahbereich ohne direkte Gebäudenachbarschaft:

$$\text{wall_exposure} = 0.35$$

Die Fassadenbegrünung wird lokal als Mittelwert der angrenzenden oder nahen Gebäudekanten übernommen. Im Nahbereich wird sie abgeschwächt:

$$\text{wall_green_local} = 0.55 \cdot \overline{\text{wall_green}}$$

Wand-Albedo und Wandbegrünung

Der Wandstil wird über zwei Reporter umgesetzt:

Wandstil	Wand-Albedo	Begrünungswert
normale Wand	0.35	0
grüne Wand	0.25	1

Die grüne Wand reduziert Wandwärmelasten und erzeugt zusätzlich eine aktive evapotranspirative Entlastung.

Einfassung

Die räumliche Einfassung `enclosedness` wird aus Gebäuden und Hecken im Radius 3 berechnet:

$$enclosedness = \min \left(1, \frac{N_{\text{building}} + 0.35N_{\text{hedge}}}{N_{\text{total}}} \right)$$

Einfassung reduziert Luftaustausch und Windentlastung. Hecken zählen nur abgeschwächt, weil sie weniger massiv wirken als Gebäude.

Schattenmodell

Das Schattenmodell ist geometrisch vereinfacht. Es nutzt Sonnenhöhe, Sonnenazimut, Gebäudehöhe und Vegetationshöhe.

Gebäudeschatten

Nur Gebäudekanten werfen Schatten. Ein Gebäudepatch gilt als Gebäudekante, wenn mindestens einer seiner vier direkten Nachbarn kein Gebäude ist.

Die Schattenrichtung wird aus dem Sonnenazimut berechnet:

$$d_x = -\sin(A)$$

$$d_y = -\cos(A)$$

Die Schattenlänge eines Gebäudes lautet:

$$L_{\text{building}} = \text{round} \left(\frac{1.00 \cdot h_{\text{building}}}{\max(0.18, \tan(\alpha))} \right)$$

Die Schattenstärke von Gebäuden beträgt:

$$\text{shadow_strength}_{\text{building}} = 0.96$$

Gebäude verschatten keine anderen Gebäudepatches. Ziel ist die Wirkung auf Aufenthaltsflächen.

Vegetationsschatten

Bäume und Hecken werfen eigene Schatten.

Für Bäume gilt:

$$L_{\text{tree}} = \text{round} \left(\frac{1.15 \cdot h_{\text{veg}}}{\max(0.18, \tan(\alpha))} \right)$$

$$r_{\text{canopy}} = \max \left(1, \text{round} \left(\frac{h_{\text{veg}}}{4} \right) \right)$$

$$\text{shadow_strength}_{\text{canopy}} = 0.72$$

$$\text{tail_decay} = 0.035$$

Für Hecken werden andere Parameter verwendet:

$$L_{\text{hedge}} = \text{round} \left(\frac{0.75 \cdot h_{\text{veg}}}{\max(0.18, \tan(\alpha))} \right)$$

$$r_{\text{hedge}} = \max \left(1, \text{round} \left(\frac{h_{\text{veg}}}{2} \right) \right)$$

$$\text{shadow_strength}_{\text{hedge}} = 0.58$$

$$tail_decay_{\text{hedge}} = 0.055$$

Die Schattenstärke im Schattenschweif wird mit zunehmender Distanz reduziert:

$$shadow_level = \max(shadow_level, \max(0.18, shadow_strength - tail_decay \cdot step))$$

Oberflächenenergiebilanz

Die Oberflächentemperatur wird in `update-thermal-state` aus einer vereinfachten Energiebilanz berechnet.

Die Energiebilanz enthält:

- absorbierte kurzwellige Strahlung
- zusätzliche Wandstrahlung
- langwellige Bilanz
- fühlbaren Wärmefluss
- latenten Wärmefluss
- Bodenwärmefluss

Solare Einstrahlung auf einen Patch

Der direkte und diffuse Strahlungsanteil wird mit `diffuse-share = 0.18` berechnet:

$$S_{\text{patch}} = S \cdot (0.18 + (1 - 0.18)(1 - shadow_level))$$

Bei Nacht oder ohne Sonne gilt:

$$S_{\text{patch}} = 0$$

Absorbierte kurzwellige Strahlung

$$Q_{\text{SW}} = SW_{\text{max}} \cdot S_{\text{patch}} \cdot (1 - \alpha)$$

Dabei ist `SW_max` die jahreszeitliche maximale kurzwellige Strahlung und `albedo` der Reflexionsanteil des Materials.

Wandnahe zusätzliche Strahlung

Die Wandbelastung wird als Zusatzterm modelliert:

$$f_h = \min \left(1.2, \frac{\text{wall_height_local}}{8} \right)$$

$$Q_{\text{wall}} = 38 \cdot \text{wall_exposure} \cdot S \cdot f_h \cdot (1 - \text{wall_albedo_local}) \cdot (1 - 0.75 \cdot \text{wall_green_local})$$

Für Nicht-Gebäudepatches wird dieser Term reduziert:

$$Q_{\text{wall}} = 0.65 \cdot Q_{\text{wall}}$$

Damit wird berücksichtigt, dass die Wand eine angrenzende Strahlungsquelle ist, aber nicht die ganze Patchoberfläche bildet.

Langwellige Bilanz

Der Himmel wird als effektive Strahlungstemperatur vereinfacht:

$$T_{\text{sky,K}} = T_{\text{air}} + 273.15 - (18 - 10S)$$

Die Oberfläche wird in Kelvin umgerechnet:

$$T_{\text{surf,K}} = T_{\text{surface}} + 273.15$$

Die Netto-Langwellenbilanz lautet:

$$Q_{\text{LW}} = \epsilon \sigma (T_{\text{sky,K}}^4 - T_{\text{surf,K}}^4)$$

Dabei ist:

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$$

Q_{LW} ist negativ, wenn die Oberfläche langwellig mehr Energie verliert als sie erhält.

Fühlbarer Wärmefluss

Der aerodynamische Austauschkoefizient wird zunächst aus Windgeschwindigkeit berechnet:

$$g_h = 0.0020 + 0.0015\sqrt{u + 0.2}$$

Einfassung reduziert den Austausch:

$$g_h = \frac{g_h}{1 + 0.55 \cdot \text{enclosedness}}$$

Vegetation reduziert ihn weiter:

$$g_h = 0.70 \cdot g_h$$

Rasen reduziert ihn leicht:

$$g_h = 0.85 \cdot g_h$$

Der fühlbare Wärmefluss lautet:

$$Q_H = \rho_{\text{air}} c_p g_h (T_{\text{surface}} - T_{\text{air,local}})$$

Mit:

$$\rho_{\text{air}} = 1.20$$

$$c_p = 1005$$

Effektive Oberflächenwärmekapazität

Die Grundformel lautet:

$$C_{\text{surface}} = 180000 + 380000 \cdot \text{thermal_mass}$$

Danach werden Sonderfälle gesetzt:

Fläche/Objekt	effektive Oberflächenwärmekapazität
Asphalt	340000
Pflaster	360000
Rasen	300000
Baum/Hecke	480000
Gründach	360000

Die Einheit ist modelllogisch eine flächenbezogene Wärmekapazität:

$$J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Diese Werte steuern, wie schnell eine Oberfläche auf Energieflüsse reagiert. Rasen wird in der aktuellen Version schnell auskühlend modelliert. Baum und Hecke bleiben stärker gedämpft.

Substratkopplung

Die Grundformel für die Wärmekapazität des Substrats lautet:

$$C_{\text{substrate}} = 420000 + 620000 \cdot \text{thermal_mass}$$

Die Grundformel für die Kopplung zwischen Oberfläche und Substrat lautet:

$$k_{\text{substrate}} = 4 + 6 \cdot \text{thermal_mass}$$

Sonderfälle:

Fläche/Objekt	Substratkopplung
Asphalt	5.0
Pflaster	5.4
Rasen	3.8
Baum/Hecke	8.5
Gründach	5.2

Der Bodenwärmefluss lautet:

$$Q_G = k_{\text{substrate}}(T_{\text{surface}} - T_{\text{substrate}})$$

Die Substrattemperatur wird zusätzlich langsam in Richtung Tiefentemperatur relaxiert:

$$Q_{\text{relax}} = \frac{C_{\text{substrate}}(T_{\text{deep}} - T_{\text{substrate}})}{(30 + 52 \cdot \text{thermal_mass}) \cdot 3600}$$

Verdunstung und latenter Wärmefluss

Wasserverfügbarkeit

Die Wasserverfügbarkeit wird aus der relativen Speicherfüllung berechnet:

$$r_w = \frac{\text{water_store}}{\text{water_store_max}}$$

$$\text{water_availability} = \max\left(0, \min\left(1, \frac{r_w - 0.05}{0.80}\right)\right)$$

Unter 5 Prozent Speicherfüllung wird praktisch keine Verdunstung angenommen. Ab etwa 85 Prozent Speicherfüllung ist die Verdunstung nicht mehr wasserlimitiert.

Sättigungsdampfdruck

Das Modell nutzt eine Tetens-Formel:

$$e_s(T) = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)$$

Die aktuelle Luftdampfdruckgröße lautet:

$$e_a = \frac{RH}{100} \cdot e_s(T_{\text{air,local}})$$

Das Dampfdruckdefizit an der Oberfläche wird berechnet als:

$$VPD = \max(0, e_s(T_{\text{surface}}) - e_a)$$

Potenzielle Verdunstungsleistung

Die potenzielle aerodynamische Verdunstungsleistung lautet:

$$E_{\text{aero}} = (22 + 52\sqrt{u + 0.2}) \cdot \text{evap_factor} \cdot \text{wetness_factor} \cdot \left(0.30 + 0.70 \cdot \min\left(1, \frac{VPD}{1.6}\right)\right)$$

Danach werden Oberflächentypen skaliert:

Fläche/Objekt	Multiplikator
Rasen	1.95
Baum/Hecke	1.25
Gründach	1.05

Die potenzielle Verdunstung wird durch die verfügbare Strahlungsenergie begrenzt:

$$Q_{LE,pot} = \min(0.92 \cdot Q_{\text{available}}, E_{\text{aero}})$$

Dabei gilt:

$$Q_{\text{available}} = \max(0, Q_{\text{SW}} + Q_{\text{wall}} + Q_{\text{LW}})$$

Bei sehr geringer Sonneneinstrahlung wird die potenzielle Verdunstung reduziert:

$$Q_{LE,pot} = 0.35 \cdot Q_{LE,pot}$$

Wasserlimit

Der latente Fluss kann nicht mehr Wasser verdunsten, als im Speicher vorhanden ist:

$$Q_{LE,water} = \frac{\text{water_store} \cdot L_v}{\Delta t}$$

Mit:

$$L_v = 2.45 \cdot 10^6$$

Der wirksame latente Fluss lautet:

$$Q_{LE} = \min(Q_{LE,pot} \cdot water_availability, Q_{LE,water})$$

Die Verdunstungsmenge wird berechnet als:

$$evap_mm = \frac{Q_{LE}\Delta t}{L_v}$$

Der Wasserspeicher wird danach fortgeschrieben:

$$water_store = \max(0, \min(water_store_max, water_store - evap_mm + recharge_mm))$$

Änderung der Oberflächentemperatur

Die Netto-Energiebilanz der Oberfläche lautet:

$$Q_{net} = Q_{SW} + Q_{wall} + Q_{LW} - Q_H - Q_{LE} - Q_G$$

Daraus folgt die ungekappte Temperaturänderung:

$$\Delta T_{surface} = \frac{Q_{net}\Delta t}{C_{surface}}$$

Die Änderung wird materialabhängig begrenzt. Dabei wird zwischen Erwärmung und Abkühlung unterschieden.

Maximale Erwärmungsraten

Fläche/Objekt	maximale Erwärmung in °C pro Stunde
normales Dach	5.4
Gründach	3.6
Gebäude sonst	4.0
Baum	2.2
Hecke	2.5
Asphalt	5.0
Sportbelag	4.6
Sand	4.2
Pflaster	3.4

Fläche/Objekt	maximale Erwärmung in °C pro Stunde
Offenpflaster	3.1
Rasen	2.5
Standard	3.8

Maximale Abkühlungsraten

Fläche/Objekt	maximale Abkühlung in °C pro Stunde
normales Dach	4.2
Gründach	6.4
Gebäude sonst	4.0
Baum	2.8
Hecke	3.0
Asphalt	4.4
Sportbelag	4.0
Sand	4.6
Pflaster	3.6
Offenpflaster	3.8
Rasen	7.8
Standard	3.8

Diese asymmetrische Kappung ist wichtig. Rasen darf sich langsam erwärmen, aber schnell auskühlen. Dadurch bleibt die didaktisch gewünschte Dynamik erhalten: Rasen wird nicht wie ein starker Wärmespeicher behandelt.

Bodennahes Luftfeld

Nach dem Oberflächenupdate wird die lokale Lufttemperatur berechnet.

Oberflächen-Footprint

Zuerst wird ein lokaler Oberflächen-Footprint gebildet. Das eigene Patch wird am stärksten gewichtet, direkte Nachbarn mittel und diagonale Nachbarn schwächer:

$$T_{\text{footprint}} = \frac{3.2T_{\text{surface}} + 0.9\bar{T}_{\text{axial}} + 0.3\bar{T}_{\text{diagonal}}}{4.4}$$

Horizontale Luftmischung

Die horizontale Mischung nutzt eine diskrete Nachbarschaftsdifferenz. Direkte Nachbarn werden voll, diagonale Nachbarn halb gewichtet.

Der Mischungskoeffizient lautet:

$$m_{\text{lat}} = 0.010 + 0.006u$$

Einfassung reduziert die Mischung:

$$m_{\text{lat}} = \frac{m_{\text{lat}}}{1 + 0.30 \cdot \text{enclosedness}}$$

Oberfläche-Luft-Kopplung

Die Kopplung der lokalen Luft an die Oberfläche lautet:

$$c_{\text{surf}} = 0.095 + 0.030\sqrt{u + 0.2}$$

Einfassung reduziert die Kopplung:

$$c_{\text{surf}} = \frac{c_{\text{surf}}}{1 + 0.40 \cdot \text{enclosedness}}$$

Bäume und Hecken reduzieren sie weiter:

$$c_{\text{surf}} = 0.90 \cdot c_{\text{surf}}$$

Gebäude reduzieren sie ebenfalls:

$$c_{\text{surf}} = 0.85 \cdot c_{\text{surf}}$$

Die Oberflächenwirkung auf die Luft lautet:

$$\Delta T_{\text{surface-air}} = c_{\text{surf}}(T_{\text{footprint}} - T_{\text{air,local}})\Delta t$$

Vertikale Mischung

Die vertikale Mischung gegen die Hintergrundluft lautet:

$$m_{\text{vert}} = 0.015 + 0.015S + 0.008\sqrt{u + 0.2}$$

Einfassung reduziert auch diesen Austausch:

$$m_{\text{vert}} = \frac{m_{\text{vert}}}{1 + 0.45 \cdot \text{enclosedness}}$$

Vegetation reduziert ihn:

$$m_{\text{vert}} = 0.85 \cdot m_{\text{vert}}$$

Die Wirkung der Hintergrundluft lautet:

$$\Delta T_{\text{background}} = m_{\text{vert}}(T_{\text{air}} - T_{\text{air,local}})\Delta t$$

Fassadenwärmelast

Die lokale Luft erhält einen zusätzlichen Fassadenwärmeterm:

$$L_{\text{wall-air}} = 0.25 \cdot \text{wall_exposure} \cdot S \cdot f_h \cdot (1 - 0.60 \cdot \text{wall_green_local})$$

Daraus wird:

$$\Delta T_{\text{wall}} = L_{\text{wall-air}}\Delta t$$

Aktive Luftkühlung durch begrünte Fassaden

Begrünte Fassaden erhalten eine eigene evapotranspirative Luftkühlung. Dafür wird ein Dampfdruckdefizit auf Basis der lokalen Lufttemperatur berechnet:

$$VPD_{\text{wall}} = \max\left(0, e_s(T_{\text{air,local}}) - \frac{RH}{100} e_s(T_{\text{air,local}})\right)$$

Der Faktor lautet:

$$f_{\text{wall,ET}} = \min\left(1, \frac{VPD_{\text{wall}}}{1.6}\right)$$

Die Kühlung lautet:

$$C_{\text{wall-air}} = 0.55 \cdot \text{wall_exposure} \cdot \text{wall_green_local} \cdot S \cdot f_h \cdot (0.35 + 0.65 f_{\text{wall,ET}})$$

Die Temperaturwirkung ist negativ:

$$\Delta T_{\text{wall-cooling}} = -C_{\text{wall-air}} \Delta t$$

Direkte Luftkühlung durch Rasen

Rasen erhält zusätzlich eine direkte lokale Luftkühlung durch ET:

$$VPD_{\text{grass}} = \max\left(0, e_s(T_{\text{air,local}}) - \frac{RH}{100} e_s(T_{\text{air,local}})\right)$$

$$f_{\text{grass,ET}} = \min\left(1, \frac{VPD_{\text{grass}}}{1.6}\right)$$

$$C_{\text{grass-air}} = 0.70 \cdot \text{water_stress} \cdot S \cdot (0.35 + 0.65 f_{\text{grass,ET}})$$

Im Code bezeichnet **water-stress** hier funktional die Wasserverfügbarkeit. Der Name ist missverständlich, weil höhere Werte mehr verfügbare Feuchte bedeuten.

Die Temperaturwirkung ist:

$$\Delta T_{\text{grass-cooling}} = -C_{\text{grass-air}} \Delta t$$

Gesamte Lufttemperaturänderung

Die gesamte lokale Lufttemperaturänderung lautet:

$$\Delta T_{\text{air,local}} = \Delta T_{\text{surface-air}} + \Delta T_{\text{lateral}} + \Delta T_{\text{background}} + \Delta T_{\text{wall}} + \Delta T_{\text{wall-cooling}} + \Delta T_{\text{grass-cooling}}$$

Die Änderung wird materialabhängig begrenzt.

Maximale lokale Luftänderung

Fläche/Objekt	maximale Änderung in °C pro Stunde
normales Dach	2.4
Gründach	1.6
Gebäude sonst	2.0
Baum	1.4
Hecke	1.5
Asphalt	3.2
Sportbelag	3.0
Sand	2.6
Pflaster	2.9
Offenpflaster	2.1
Rasen	1.8
Standard	2.2

Aufenthaltsbelastung

Die aktuelle Hitzelast wird über einen vereinfachten Aufenthaltsbelastungsindex **comfort-index** berechnet. Er kombiniert lokale Luft, direkte Sonne, Oberflächenwärme, Wandbelastung, Luftfeuchte, Windentlastung, Vegetationsentlastung und Fassaden-ET.

Dieser Index ist kein medizinischer Hitzestressindex. Er ist ein didaktischer Proxy für Aufenthaltsbelastung.

Direkte Sonne

$$S_{\text{direct}} = S(1 - \text{shadow_level})$$

Der kurzwellige Beitrag zum Menschen lautet:

$$SW_{\text{eq}} = 7.0 \cdot S_{\text{direct}}$$

Bei Bäumen und Hecken wird dieser Beitrag reduziert:

$$SW_{\text{eq}} = 0.65 \cdot SW_{\text{eq}}$$

Langwellige und Oberflächenbelastung

Zunächst werden Temperaturüberschüsse berechnet:

$$E_{\text{surface}} = \max(0, T_{\text{surface}} - T_{\text{air,local}})$$

$$E_{\text{axial}} = \max(0, \bar{T}_{\text{axial}} - T_{\text{air,local}})$$

$$E_{\text{diagonal}} = \max(0, \bar{T}_{\text{diagonal}} - T_{\text{air,local}})$$

Der langwellige Belastungsbeitrag lautet:

$$LW_{\text{eq}} = 0.38E_{\text{surface}} + 0.22E_{\text{axial}} + 0.10E_{\text{diagonal}} + 2.8 \cdot \text{wall_exposure} \cdot S \cdot f_h \cdot (1 - 0.80 \cdot \text{wall_green_local})$$

Feuchtebelastung

$$H_{\text{humidity}} = 0.03 \cdot \max(0, RH - 55)$$

Windentlastung

$$R_{\text{wind}} = 0.9 \sqrt{\max(0.5, u)}$$

Einfassung reduziert die Windentlastung:

$$R_{\text{wind}} = R_{\text{wind}}(1 - 0.20 \cdot \text{enclosedness})$$

Vegetationsentlastung

$$R_{\text{veg}} = 0.35 \cdot \text{veg_nearby}$$

Fassaden-ET-Entlastung im Komfortindex

Die aktive Entlastung durch begrünte Fassaden lautet:

$$R_{\text{wall,ET}} = 3.2 \cdot \text{wall_exposure} \cdot \text{wall_green_local} \cdot S \cdot (0.35 + 0.65f_{\text{wall,ET}})$$

Gesamter Aufenthaltsindex

$$\text{comfort_index} = T_{\text{air,local}} + SW_{\text{eq}} + LW_{\text{eq}} + H_{\text{humidity}} - R_{\text{wind}} - R_{\text{veg}} - R_{\text{wall,ET}}$$

Zusätzlich speichert das Modell die Einzelkomponenten `shortwave-human`, `longwave-human` und `exposure-temp`.

Hitzelast über die Schulzeit

Die integrierte Hitzelast `heat-dose-comfort` wird nur während der Schulzeit fortgeschrieben:

$$7 \leq t < 16$$

Für jeden Zeitschritt wird aus dem `comfort-index` ein Belastungsfaktor zwischen 0 und 1 berechnet.

Belastungsfaktor Sommer

Für Sommer gilt:

Indexbereich	Belastungsfaktor
bis 24	0
24 bis 29	linear von 0.08 bis 0.25
29 bis 38	linear von 0.25 bis 1.00
über 38	1

Formelbereiche:

$$idx \leq 24 \Rightarrow score = 0$$

$$24 < idx \leq 29 \Rightarrow score = 0.08 + 0.17 \frac{idx - 24}{5}$$

$$29 < idx \leq 38 \Rightarrow score = 0.25 + 0.75 \frac{idx - 29}{9}$$

$$idx > 38 \Rightarrow score = 1$$

Belastungsfaktor Frühling/Herbst

$$idx \leq 18 \Rightarrow score = 0$$

$$18 < idx \leq 23 \Rightarrow score = 0.08 + 0.17 \frac{idx - 18}{5}$$

$$23 < idx \leq 31 \Rightarrow score = 0.25 + 0.75 \frac{idx - 23}{8}$$

$$idx > 31 \Rightarrow score = 1$$

Belastungsfaktor Winter

$$idx \leq 8 \Rightarrow score = 0$$

$$8 < idx \leq 12 \Rightarrow score = 0.08 + 0.17 \frac{idx - 8}{4}$$

$$12 < idx \leq 18 \Rightarrow score = 0.25 + 0.75 \frac{idx - 12}{6}$$

$$idx > 18 \Rightarrow score = 1$$

Dosisgrößen

Während der Schulzeit werden drei Dosisgrößen integriert:

$$heat_dose_air = heat_dose_air + \max(0, T_{air,local} - 28)\Delta t$$

$$heat_dose_surface = heat_dose_surface + \max(0, T_{surface} - 36)\Delta t$$

$$heat_dose_comfort = heat_dose_comfort + score\Delta t$$

Die wichtigste Auswertung ist **heat-dose-comfort**. Sie wird als äquivalente Belastungsstunden während der Schulzeit gelesen.

Hitzelastklassen

Die aufsummierte Hitzelast wird in fünf Klassen übersetzt:

Klasse	Farbe	Bereich
1	blau	bis 1 h
2	grün	über 1 bis 2.5 h
3	gelb	über 2.5 bis 5 h
4	orange	über 5 bis 6.5 h
5	rot	über 6.5 h

Die gleiche Klassifikation wird für Kartenansicht, Monitoring und Vorher/Nachher-Vergleich genutzt.

Aufenthaltsflächen

Nicht alle Patches werden als Aufenthaltsflächen gezählt. Der Reporter **aufenthaltsflaechen** umfasst nur Patches mit `object-kind = "none"` und einer nutzbaren Bodenklasse:

- Asphalt
- Pflaster
- Offenpflaster
- Rasen
- Sportbelag

- Sand

Gebäude, Bäume und Hecken werden nicht als Aufenthaltsfläche gezählt.

Kartenansichten

Das Modell besitzt folgende Kartenansichten:

Kartenansicht	dargestellte Größe
Materialien & Elemente	Bodenklassen, Objekte, Dächer, Fassaden
Schatten aktuell	<code>shadow-level</code>
Oberflächentemperatur aktuell	<code>surface-temp</code>
Lufttemperatur aktuell	<code>air-temp-local</code>
Hitzelast aktuell	<code>comfort-index</code>
Hitzelast Schulzeit	<code>heat-dose-comfort</code>
Hitzelast Änderung	Differenz zu gespeicherter Referenz

Hitzelast Änderung

Die Hitzelaständerung wird als Differenz berechnet:

$$\Delta H = \text{heat_dose_comfort} - \text{ref_heat_dose_comfort}$$

Negative Werte bedeuten Entlastung. Positive Werte bedeuten Verschlechterung.

Die Farblogik lautet:

Differenz	Farbe	Bedeutung
bis -2.5	blau	stark besser
-2.5 bis -1.0	grün	besser
-1.0 bis 1.0	grau	kaum anders
1.0 bis 2.5	orange	schlechter
ab 2.5	rot	stark schlechter

Vorher/Nachher-Vergleich

Der Vergleich nutzt keine externe Datei. Die Referenz wird im laufenden Modellzustand in den Patch-Variablen gespeichert:

- `ref-active?`
- `ref-heat-dose-comfort`
- `ref-heat-dose-air`
- `ref-heat-dose-surface`
- `ref-comfort-index`
- `ref-comfort-index-max`
- `ref-shadow-level`

Die Referenz gilt global für die gesamte Karte. Eine spätere Auswahl wird nur verwendet, um einen Teilbereich auszuwerten.

Vergleichsmetriken

Für eine ausgewählte Fläche werden berechnet:

- mittlere Hitzelast vorher/nachher
- maximale Hitzelast vorher/nachher
- Schattenanteil vorher/nachher
- Luftwärmedosis vorher/nachher
- Oberflächenwärme vorher/nachher
- Anteil orange/rot
- Anteil rot
- Anteil blau/grün/gelb
- verbesserte Fläche
- mindestens eine Klasse besser
- mindestens zwei Klassen besser
- Klassenwanderungen aus kritischen Klassen

Web-Version

Die Web-Version deaktiviert die lokale Szenario-Dateiverwaltung. Es werden keine lokalen Dateien geschrieben oder gelesen.

Dauerhaftes Speichern von Szenarien ist in der Web-Version nicht Teil der Modelllogik. Der Vorher/Nachher-Vergleich funktioniert nur innerhalb der laufenden Simulation im Browser. Nach Neuladen der Seite oder nach `Modellstart --reset` ist der Vergleichszustand verloren.

Die Web-Version nutzt die fest im Modell gespeicherte Referenzgeometrie.

Didaktische Interpretation

Das Modell soll folgende Einsichten sichtbar machen:

- Heiße Oberflächen und warme Luft sind nicht dasselbe.
- Schatten reduziert die direkte Aufheizung und die Aufenthaltsbelastung.
- Vegetation wirkt über Schatten und Verdunstung.
- Rasen wirkt anders als Baum, weil Baum zusätzlich 3D-Schatten erzeugt.
- Fassadenbegrünung wirkt lokal stark in der Nähe von Gebäuden, vor allem über reduzierte Wandwärmelast und ET-Entlastung.
- Gründächer verbessern Dachflächen, sind aber nicht automatisch stärker als bodengebundener Rasen.
- Asphalt, Sportbelag und trockene harte Oberflächen erzeugen hohe Oberflächentemperaturen.
- Die entscheidende Frage ist nicht nur, wo es kurzzeitig heiß ist, sondern wo sich während der Schulzeit Hitzelast aufsummiert.
- Maßnahmen sollen dort gesetzt werden, wo sie die belasteten Aufenthaltsflächen tatsächlich verbessern.

Modellgrenzen

Das Modell ist bewusst vereinfacht. Es enthält keine vollständige mikrometeorologische Stadtklimaphysik. Insbesondere werden nicht abgebildet:

- echte 3D-Strömungsdynamik
- turbulente Energiebilanz mit stabilitätsabhängiger Schichtung
- echte Gebäudewandorientierungen
- reale Bodenfeuchteprofile
- echte Pflanzenphysiologie
- reale Wurzelräume
- Wolken, wechselnde Wetterlagen oder Niederschlagsereignisse
- Kalibrierung gegen Messdaten
- vollständige humanbiometeorologische Indizes wie UTCI oder PET

Die Hitzelast ist deshalb kein medizinischer Grenzwert. Sie ist ein didaktischer Belastungsproxy.

Zentrale Prozeduren

Prozedur	Funktion
setup	initialisiert Modell, Welt, Stationen, Temperaturen und Plots
simulieren	führt den Tageslauf stundenweise fort
lauf-neu-vorbereiten	setzt dynamische Tageswerte zurück, erhält Geometrie und Referenz
update-solar-geometry	berechnet Tagesgang, Sonne, Hintergrundluft und Feuchte
cast-shadows	berechnet Gebäude- und Vegetationsschatten
rebuild-derived-fields	berechnet Vegetations-, Wand- und Einfassungsfelder
update-thermal-state	berechnet Oberfläche, Substrat, Wasser, Luft und Hitzedosis
compute-comfort-index	berechnet aktuelle Aufenthaltsbelastung
referenz-speichern	merkt Vorher-Zustand in Patchvariablen
auswahl-vergleichen	wertet Vergleich für Auswahlfläche aus
recolor-world	setzt Kartenansicht und Farblogik
handle-mouse-edit	steuert interaktive Bearbeitung
apply-Element	setzt Boden, Objekt, Dach oder Wand
toggle-alle-daecher	schaltet Dächer normal/begrünt
toggle-alle-waende	schaltet Wände normal/begrünt

Zusammenfassung der physikalischen Kernlogik

Das Modell folgt dieser Kette:

1. Die Jahreszeit erzeugt Tageslänge, Sonnenhöhe, solaren Antrieb, Hintergrundtemperatur und Luftfeuchte.
2. Gebäude und Vegetation werfen Schatten.
3. Materialien bestimmen Absorption, langwellige Abstrahlung, thermische Trägheit und Verdunstungsfähigkeit.
4. Wasserverfügbarkeit begrenzt die Verdunstung.
5. Die Oberflächentemperatur entsteht aus kurzweiliger Strahlung, langweiliger Bilanz, fühlbarer Wärme, latenter Wärme und Substratwärmefluss.
6. Die lokale Lufttemperatur reagiert auf Oberflächen, Nachbarschaftsmischung, Hintergrundluft, Fassadenwärme, Fassadenbegrünung und Rasen-ET.
7. Die Aufenthaltsbelastung kombiniert Lufttemperatur, Sonne, heiße Oberflächen, Wandlast, Luftfeuchte, Windentlastung, Vegetation und Fassaden-ET.

8. Während der Schulzeit wird aus der aktuellen Belastung eine Hitzedosis integriert.
9. Diese Dosis wird in Hitzelastklassen und Vorher/Nachher-Differenzen übersetzt.

Damit bildet das Modell keine exakte Realität nach, sondern eine transparente Wirklogik für schulische Klima- und Anpassungsfragen.