

Technische Dokumentation

Modellkonzept und Physik

Rieke Ammoneit

2026-04-28

Zweck des Modells

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

Die Modellphysik ist **semi-mechanistisch**. Oberflächentemperaturen werden aus einer vereinfachten Energiebilanz berechnet und an ein parametrisiertes bodennahes Luftfeld gekoppelt. Material-, Schatten-, Wasser-, Vegetations- und Fassadeneffekte wirken dabei über getrennte Prozesspfade. Der Variantenvergleich ist deshalb physikalisch begründet, solange er relativ und modellintern interpretiert wird. Die absolute Temperaturhöhe und die exakte Stärke einzelner Maßnahmen sind dagegen nicht validiert und daher nicht als standortspezifische Prognose zu verwenden.

Das Modell verwendet **effektive Prozessparameter**. Diese Parameter sind keine willkürlichen didaktischen Stellgrößen, sondern notwendige Näherungen für physikalische Prozesse, die in einem vereinfachten zweidimensionalen Modell nicht vollständig aufgelöst werden können. Insbesondere löst das Modell keine vollständige Massen- und Impulserhaltung des bodennahen Luftvolumens. Deshalb werden Wärmeübergang, vertikale und laterale Luftmischung, Verdunstung, Substratkopplung und Fassadenwirkung über effektive Koeffizienten beschrieben. Diese Parametrisierung ersetzt keine Physik, sondern schließt die vereinfachte Modellstruktur so, dass bekannte Wirkungsrichtungen und relative Unterschiede zwischen Materialien und Maßnahmen plausibel abgebildet werden.

Die Physik ist hart genug für relative Wirkungsvergleiche, aber nicht hart genug für quantitative Planungsaussagen.

Der zentrale Einsatzfall ist daher nicht die Vorhersage absoluter Temperaturen, sondern der kontrollierte 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

Leseschlüssel für Lehrkräfte

Diese Dokumentation beschreibt ein vereinfachtes Mikroklima-Modell. Viele Begriffe stammen aus der Physik oder aus der Mikrometeorologie, werden im Modell aber bewusst vereinfacht verwendet. Der folgende Abschnitt erklärt die wichtigsten Begriffe, damit die späteren Formeln und Tabellen lesbar werden.

Was bedeutet „physikalisch plausibel“?

Physikalisch plausibel bedeutet in diesem Modell nicht, dass jede reale Luftbewegung, jeder Bodenprozess und jede Pflanze exakt berechnet wird. Es bedeutet: Die wichtigsten Wirkungsrichtungen sind physikalisch begründet und voneinander getrennt modelliert.

Ein Beispiel:

- Asphalt wird nicht einfach rot eingefärbt, weil Asphalt „heiß sein soll“.
- Asphalt wird heiß, weil er dunkel ist, kaum reflektiert, nicht verdunstet und wenig Kühlung durch Wasser liefert.
- Rasen bleibt kühler, weil er Wasser speichern und über Verdunstung Energie abführen kann.
- Bäume wirken zusätzlich über Schatten, nicht nur über eine grüne Oberfläche.

Das Modell bildet also keine beliebigen Farben ab, sondern eine vereinfachte Wirklogik: Strahlung, Material, Wasser, Schatten, Luftaustausch und Vegetation greifen zusammen.

Was wird im Modell eigentlich verglichen?

Das Modell vergleicht immer Varianten unter denselben Randbedingungen. Das heißt: Tagesgang, Jahreszeit, Wind, Sonne und Modelllogik bleiben gleich. Verändert wird nur der Schulhofzustand, zum Beispiel Asphalt gegen Rasen oder normales Dach gegen Gründach.

Dadurch sind Aussagen dieser Art begründet:

Im Modell senkt diese Maßnahme die Hitzelast stärker als jene Maßnahme.

Nicht begründet sind Aussagen dieser Art:

Diese Maßnahme senkt auf einem realen Schulhof die Lufttemperatur exakt um 2.3 °C.

Der Vergleich ist also **relativ stark**, aber **absolut nicht kalibriert**.

Die drei Temperaturbegriffe im Modell

Im Modell gibt es nicht nur „die Temperatur“. Es werden mehrere Temperaturarten unterschieden.

Begriff	Variable	Bedeutung
Hintergrundlufttemperatur	<code>air-temp</code>	allgemeiner Tagesgang der Lufttemperatur, also der meteorologische Antrieb
lokale Lufttemperatur	<code>air-temp-local</code>	Lufttemperatur über einem bestimmten Patch des Schulhofs
Oberflächentemperatur	<code>surface-temp</code>	Temperatur der Oberfläche, zum Beispiel Asphalt, Rasen, Dach oder Sand
Substrattemperatur	<code>substrate-temp</code>	vereinfachter Wärmespeicher unter oder hinter der Oberfläche

Diese Trennung ist zentral. Eine Oberfläche kann sehr heiß sein, ohne dass die Luft darüber genauso heiß ist. Asphalt kann zum Beispiel deutlich heißer werden als die lokale Luft. Die Luft reagiert verzögert, weil sie durch Wind, Mischung und Austausch mit der Umgebung beeinflusst wird.

Patch, Fläche und Objekt

Der Schulhof besteht aus Rasterzellen. In NetLogo heißen diese Rasterzellen `patches`.

Ein Patch kann zwei unterschiedliche Dinge besitzen:

Ebene	Beispiel	Bedeutung
Boden	Asphalt, Pflaster, Rasen, Sand	Das Material der Fläche

Ebene	Beispiel	Bedeutung
Objekt	Baum, Hecke, Gebäude	Etwas, das auf der Fläche steht oder sie ersetzt

Diese Trennung ist wichtig. Ein Baum ist nicht einfach Rasen. Ein Baum hat Höhe, wirft Schatten und beeinflusst seine Umgebung. Ein Gebäude ist nicht einfach eine graue Fläche. Es besitzt Dach, Wand, Höhe und Schattenwirkung.

Prozessgruppen des Modells

Das Modell setzt sich aus mehreren Prozessgruppen zusammen.

Prozessgruppe	Einfache Erklärung	Wirkung im Modell
kurzwellige Strahlung	Sonnenstrahlung trifft auf eine Oberfläche	erwärmt Oberflächen abhängig von Sonne, Schatten und Albedo
langwellige Strahlung	warme Oberflächen geben Wärmestrahlung ab	kann Oberflächen nachts abkühlen
Wärmespeicherung	Materialien speichern Wärme unterschiedlich stark	bestimmt, wie schnell Flächen warm oder kalt werden
fühlbarer Wärmefluss	Wärmeübergang zwischen Oberfläche und Luft	koppelt heiße Oberflächen an die lokale Luft
latenter Wärmefluss	Energieverlust durch Verdunstung	kühlt feuchte oder vegetationsnahe Flächen
Bodenwärmefluss	Wärme geht in einen vereinfachten Untergrundspeicher	puffert Erwärmung und Abkühlung
Luftmischung	lokale Luft wird mit Nachbarschaft und Hintergrundluft gemischt	verhindert, dass Lufttemperaturen sofort Oberflächentemperaturen werden
Schattenwurf	Gebäude und Vegetation schirmen direkte Sonne ab	reduziert solare Aufheizung
Hitzelast	vereinfachte Aufenthaltsbelastung für Menschen	fasst Luft, Sonne, Oberflächenwärme, Wind und Vegetation zusammen

Harte und weichere Modellteile

Nicht alle Teile des Modells sind gleich hart.

Modellteil	Einordnung	Begründung
Materialunterschiede	relativ stark begründet	Albedo, Verdunstung, Wärmespeicherung und Oberfläche werden getrennt modelliert
Schattenwirkung	relativ stark begründet	Schatten reduziert direkte Einstrahlung geometrisch vereinfachte Energiebilanz mit Strahlung, Wärmefluss, Verdunstung und Speicher
Oberflächentemperatur	stark vereinfacht, aber physikalisch strukturiert	keine echte 3D-Strömung, sondern Kopplung, Mischung und Austausch
lokale Lufttemperatur	stärker parametrisiert	Schatten und Verdunstung werden abgebildet, aber keine echte Pflanzenphysiologie
Vegetationswirkung	plausibel, aber parametrisiert	lokale Wandwirkung und ET-Kühlung, aber keine echte Fassadenströmung
Fassadenbegrünung	plausibel, aber stark parametrisiert	kein UTCI, PET oder medizinischer Grenzwert
Hitzelastindex	didaktischer Proxy	

Kurz gesagt: Die Modellphysik ist besonders belastbar für **relative Wirkungsvergleiche**, weniger für **absolute Zahlenwerte**.

Glossar zentraler Modellgrößen

Die folgenden Begriffe tauchen in der Dokumentation mehrfach auf.

Begriff	Bedeutung im Modell
Albedo	Anteil der Sonnenstrahlung, der reflektiert wird. Niedrige Albedo bedeutet starke Absorption und stärkere Erwärmung.
Emissivität	Fähigkeit einer Oberfläche, langwellige Wärmestrahlung abzugeben.

Begriff	Bedeutung im Modell
thermische Masse	effektive Trägheit einer Oberfläche. Hohe Werte bedeuten: Die Fläche reagiert langsamer auf Erwärmung und Abkühlung.
Verdunstungsfaktor	modellinterne Fähigkeit einer Fläche, über Wasserverdunstung Energie abzuführen.
Wasserspeicher	vereinfachter Speicher, aus dem Verdunstung versorgt wird. Ohne Wasser keine relevante Verdunstung.
Feuchtefaktor	beschreibt, wie stark eine feuchte Oberfläche tatsächlich verdunstungswirksam ist.
Wasserverfügbarkeit	aktueller Zustand des Wasserspeichers. Hohe Werte bedeuten: Verdunstung ist möglich.
Schattenlevel	Anteil der Abschirmung direkter Sonne auf einem Patch.
Vegetationseinfluss	Wirkung von Bäumen und Hecken in der Umgebung eines Patches.
Wandexposition	beschreibt, wie stark ein Patch durch benachbarte Gebäudewände beeinflusst wird.
Einfassung	beschreibt, wie stark ein Ort durch Gebäude und Hecken räumlich eingeschlossen ist.
Oberflächen-Footprint	Mischung aus eigener Oberfläche und Nachbaroberflächen, die auf die lokale Luft wirkt.
Hitzelast	vereinfachter Belastungswert für den Aufenthalt auf dem Schulhof.
Hitzedosis Aufenthaltsfläche	über die Schulzeit aufsummierte Hitzelast. begehbare oder nutzbare Fläche ohne Gebäude, Baum oder Hecke.

Einheiten und Skalen

Viele Modellgrößen sind nicht direkt als Messwerte zu verstehen, sondern als effektive Modellgrößen. Trotzdem folgen sie einer klaren Skalenlogik.

Größe	Einheit oder Skala	Interpretation
Temperatur	°C	Luft-, Oberflächen- oder Substrattemperatur
Zeit	h	Modellzeit in Stunden
interner Zeitschritt	h	0.25 h entspricht 15 Minuten

Größe	Einheit oder Skala	Interpretation
Strahlungs- und Wärmeflüsse Wasserspeicher	modelllogisch W/m ² mm	Energiefluss pro Fläche vereinfachte Wasserhöhe im Patchspeicher
Albedo	0 bis 1	0 = keine Reflexion, 1 = vollständige Reflexion
Emissivität	0 bis 1	1 = sehr gute langwellige Abstrahlung
Schattenlevel	0 bis 1	0 = kein Schatten, 1 = sehr starke Verschattung
Vegetationseinfluss	0 bis 1	0 = kein Einfluss, 1 = starker Einfluss
Einfassung	0 bis 1	0 = offen, 1 = stark eingefasst
Hitzelastklasse	1 bis 5	blau bis rot, geringe bis starke Belastung

Wie die Formeln zu lesen sind

Die Formeln in dieser Dokumentation sollen die Modelllogik transparent machen. Sie sind nicht als vollständige mikrometeorologische Theorie zu lesen. Viele Terme sind bewusst einfach gehalten.

Ein Beispiel:

Die Oberflächenenergiebilanz lautet im Modell vereinfacht:

$$Q_{\text{net}} = Q_{\text{SW}} + Q_{\text{wall}} + Q_{\text{LW}} - Q_{\text{H}} - Q_{\text{LE}} - Q_{\text{G}}$$

Das bedeutet in Worten:

Die Oberfläche wird durch Sonne, Wände und langwellige Strahlung erwärmt oder abgekühlt. Gleichzeitig verliert sie Energie an die Luft, durch Verdunstung und an den Untergrund.

Die Formel ist also kein Selbstzweck. Sie zeigt, welche Prozessgruppen im Modell getrennt berücksichtigt werden.

Was Lehrkräfte aus dem Modell ableiten können

Das Modell erlaubt folgende fachlich sinnvolle Aussagen:

- Welche Flächen werden im Modell besonders stark belastet?
- Welche Rolle spielen Schatten, Material und Vegetation?
- Wo wirken Maßnahmen lokal und wo flächig?
- Welche Maßnahme verbessert die Hitzelast auf Aufenthaltsflächen stärker?
- Warum kann eine Maßnahme an einer Stelle sinnvoll sein, an einer anderen aber wenig bringen?
- Warum reicht es nicht, einfach „mehr Grün“ zu fordern, sondern warum Lage, Schatten, Nutzung und Material zusammen betrachtet werden müssen?

Das Modell erlaubt nicht:

- eine exakte Temperaturprognose für einen realen Schulhof,
- eine belastbare Bauplanungsentscheidung ohne weitere Fachanalyse,
- eine medizinische Bewertung von Hitzestress,
- eine exakte Aussage über reale Grad-Celsius-Effekte einzelner Maßnahmen.

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
<code>ground-kind</code>	Bodenklasse des Patches
<code>object-kind</code>	Objekt auf dem Patch
<code>roof-style</code>	Dachtyp bei Gebäuden
<code>wall-style</code>	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
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:

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

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

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

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:

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

Im Nahbereich ohne direkte Gebäudenachbarschaft:

$$wall_exposure = 0.35$$

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

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

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:

$$shadow_strength_{\text{building}} = 0.96$$

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:

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

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

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

$$\text{tail_decay}_{\text{hedge}} = 0.055$$

Die Schattenstärke im Schattenschweif wird mit zunehmender Distanz reduziert:

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

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:

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

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-Longwellenbilanz lautet:

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

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 modellogisch 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:

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

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:

$$Q_{\text{net}} = Q_{\text{SW}} + Q_{\text{wall}} + Q_{\text{LW}} - Q_{\text{H}} - Q_{\text{LE}} - Q_{\text{G}}$$

Daraus folgt die ungekappte Temperaturänderung:

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

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
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

Fläche/Objekt	maximale Abkühlung in °C pro Stunde
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:

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

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:

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

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:

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

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

Fläche/Objekt	maximale Änderung in °C pro Stunde
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 kurzweilige 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:

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

Feuchtebelastung

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

Windentlastung

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

Einfassung reduziert die Windentlastung:

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

Vegetationsentlastung

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

Fassaden-ET-Entlastung im Komfortindex

Die aktive Entlastung durch begrünte Fassaden lautet:

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

Gesamter Aufenthaltsindex

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

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>

Kartenansicht	dargestellte Größe
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
<code>setup</code>	initialisiert Modell, Welt, Stationen, Temperaturen und Plots
<code>simulieren</code> <code>lauf-neu-vorbereiten</code>	führt den Tageslauf stundenweise fort setzt dynamische Tageswerte zurück, erhält Geometrie und Referenz
<code>update-solar-geometry</code>	berechnet Tagesgang, Sonne, Hintergrundluft und Feuchte
<code>cast-shadows</code> <code>rebuild-derived-fields</code>	berechnet Gebäude- und Vegetationsschatten berechnet Vegetations-, Wand- und Einfassungsfelder
<code>update-thermal-state</code>	berechnet Oberfläche, Substrat, Wasser, Luft und Hitzedosis

Prozedur	Funktion
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.