

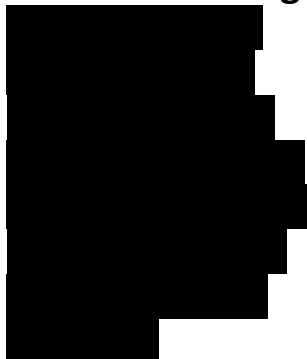
München, Paketposthalle

Mikroklima-Bewertung
für austauscharme Hochdruck-Sommerwetterlagen

02.12.2024 - rev B

Mit Herzog de Meuron Architekten
Für die Büschl Unternehmensgruppe

Transsolar Energietechnik GmbH



Inhaltsverzeichnis

Liste der Tabelle	4
Abbildungsverzeichnis	5
Zusammenfassung	10
1 Einführung in die Mikroklima-Modellierung (ENVI-met)	11
1.1 Allgemeine Modellbeschreibung	12
1.1.1 1D-Atmosphärengrenzmodell	13
1.1.2 Hybrides 1D-3D-Bodenmodell	16
1.1.3 3D-Atmosphärenmodell (d. h. der Kernsimulationsbereich)	18
1.2 3D-Atmosphärenmodell: Luftstrom (CFD)	19
1.2.1 Mittlerer Luftstrom	19
1.2.2 Temperatur und Luftfeuchtigkeit	20
1.2.3 Turbulenz und Austauschprozesse	21
1.3 3D-Atmosphärenmodell: Vegetation	23
1.3.1 Luftstrommodellierung durch Vegetationsdach	26
1.3.2 Vegetationsphysiologie: Photosynthese und Stomata-Leitfähigkeit im Blattmaßstab	27
1.4 3D-Atmosphärenmodell: Bestrahlung & MRT	36
2 Paketpostareale Mikroklima-Simulationsmodell	39
2.1 Region von Interesse	39
2.2 Übersicht über das 3D-Modell	40
2.2.1 Bestand	40
2.2.2 B-Plan 1926a	41
2.2.3 B-Plan 2147	42

2.3	Randbedingungen: Vegetation.....	43
2.4	Randbedingungen: Dachbegrünung	46
2.5	Randbedingungen: Innenhofbegrünung.....	49
2.6	Randbedingungen: Grünflächen und Boden	51
2.7	Randbedingungen: Bodenfeuchte und Bodentemperatur.....	53
2.8	Randbedingungen: Fassadenbegrünung	54
2.9	Randbedingungen: Gebäudehülle	58
3	Wetterdaten	59
3.1	Referenztag Hochsommer (20.7) aus lokalem DWD TRY Wetterdatensatz (2 Tage).....	59
3.1.1	Lufttemperatur (°C).....	60
3.1.2	Relative Luftfeuchte (%)	60
3.1.3	Solarstrahlung (W/m ²)	61
3.1.4	Bewölkungsgrad (Achtel).....	61
3.1.5	Windgeschwindigkeit (m/s).....	62
3.1.6	Windrichtung (°).....	62
3.2	Generierung des ENVI-met 1D-Atmosphärenmodells aus der DWD TRY-Referenz Hochsommertag (20.7)	63
3.2.1	1D-Potentialtemperaturprofil (°C).....	64
3.2.2	1D-Feuchtigkeitsprofil (g/Kg)	64
3.2.3	1D-Windgeschwindigkeitprofil (m/s).....	65
3.2.4	1D-Turbulenzprofil TKE (m ² /s ²).....	65
4	Auswirkungen der Größe des Simulationsmodells und der Rasterauflösung	66
4.1	Auswirkungen der Rasterauflösung	66
4.2	Auswirkungen der Größe des Simulationsmodells	68
5	Menschlicher Wärmekomfort	70
5.1	Strahlung und MRT.....	70
5.2	Operativ Temperatur.....	70

5.3	Menschlicher bioklimatischer Index - PET-Komfortskala.....	71
6	Kühlende Wirkung von Vegetation	73
6.1	Grundlagen.....	73
6.2	Auswirkung der Begrünung + Baumstellungen	74
6.3	Auswirkung der Fassadenbegrünung (Oberflächentemperaturen der Fassade)	79
6.4	Fazit zum kühlenden Effekt der Vegetation.....	82
7	Mikroklima: Außen-Komfort Ergebnisse	83
7.1	Potenzielle Temperatur.....	84
7.2	Menschlicher bioklimatischer Index (PET)	89
8	Appendix	95
8.1	Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen und auf Dächern.....	95

Liste der Tabelle

Tabelle 1: Parameter der Q10-Funktionen für C3- und C4-Pflanzen (Jacobs, 1994).....	31
Tabelle 2: Modellerte Wuchsordnung der Bäume	44
Tabelle 3: Beschreibung der Vegetation mit den verschiedenen Wuchsordnungen	45
Tabelle 4: Bodeneigenschaften im 3D-Modell.....	52
Tabelle 5: Randbedingungen: Bodenfeuchte und Bodentemperatur	53
Tabelle 6: Randbedingungen: Fassade U-Werte + g-Werte.....	58
Tabelle 7: Modellerte Wuchsordnung der Bäume	74
Tabelle 8: Lufttemperatur, Luftfeuchte und mittlere Strahlungstemperatur (MRT) im Bereich nordwestlich der Paketposthalle, für die drei untersuchten Bebauungsvarianten (20. Juli – 14:00)	82

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über die drei ENVI-met Submodule (1D-Atmosphärenmodell, Hybrid 1D-3D-Bodenmodell, Kern 3D-Modell) Quelle: Huttner.....	13
Abbildung 2: Vertikale Schichten eines typischen Bodenprofils in ENVI-met.....	17
Abbildung 3: Definition der 3D-Wurzelstruktur eines Baumes in Simulationssoftware Quelle: Envimet.....	25
Abbildung 4: Vergleich der Proof-of-Concept-Simulationsergebnisse zwischen AVF- und IVS-Strahlungsschemata für langwellige Strahlung (nach (Simon, et al., 2021))	37
Abbildung 5: Vergleich der Proof-of-Concept-Simulationsergebnisse zwischen AVF- und IVS-Strahlungsschemata für reflektierter kurzwellige Strahlung (nach (Simon, et al., 2021)).....	37
Abbildung 6: Vergleich der Proof-of-Concept-Simulationsergebnisse zwischen AVF- und IVS-Strahlungsschemata für der mittleren Strahlungstemperatur (MRT) (nach (Simon, et al., 2021)).....	38
Abbildung 7: Vergleich zwischen Standard- (links) und ACRT-Modul (rechts) für die Strahlungsmodellierung durch Vegetation und deren Auswirkung auf die mittlere Strahlungstemperatur.....	38
Abbildung 8: Region von Interesse Quelle: LHM.....	39
Abbildung 9: SW-Ansicht des erweiterten Simulationsbereichs für das ENVI-met 3D-Modell - Bestand	40
Abbildung 10: SW-Ansicht des erweiterten Simulationsbereichs für das ENVI-met 3D-Modell – B-Plan 1926a	41
Abbildung 11: SW-Ansicht des erweiterten Simulationsbereichs für das ENVI-met 3D-Modell – B-Plan 2147	42
Abbildung 12: Baumstandorte und -arten – Bestand Quelle: LHM	43
Abbildung 13: Baumstandorte und -arten - B-Plan 1926a Quelle: LHM.....	43
Abbildung 14: Baumstandorte und -arten - B-Plan 2147 Quelle: LHM, Vogt, Herzog de Meuron	43
Abbildung 15: Dachbegrünung – Bestand Quelle. LHM	46
Abbildung 16: Dachbegrünung - B-Plan 1926a Quelle. LHM	46
Abbildung 17: Dachbegrünung - B-Plan 2147 Quelle. LHM, Vogt, Herzog de Meuron.....	46

Abbildung 18: Dachbegrünung - B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 01.03.2024).....	47
Abbildung 19: Dachbegrünung - B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 01.03.2024).....	48
Abbildung 20: <i>Innenhof</i> begrünung - B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 01.03.2024).....	49
Abbildung 21: Innenhofbegrünung - B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 01.03.2024).....	50
Abbildung 22: Grünflächen - Bestand	51
Abbildung 23: Grünflächen - B-Plan 1926a	51
Abbildung 24: Grünflächen - B-Plan 2147	51
Abbildung 25: Bodeneigenschaften - Bestand	52
Abbildung 26: Bodeneigenschaften - B-Plan 1926a	52
Abbildung 27: Bodeneigenschaften - B-Plan 2147	52
Abbildung 28: Fassadenbegrünung B-Plan 2147 (Beispiel)	54
Abbildung 29: Fassadenbegrünung - B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails für von Vogt (Stand: 06.03.2024).....	55
Abbildung 30: Fassadenbegrünung bodengebunden- B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 06.03.2024)	56
Abbildung 31: Fassadenbegrünung Fassadengebunden- B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 06.03.2024)	57
Abbildung 32: Lufttemperatur (°C) am Referenz Hochsommertag	60
Abbildung 33: Relative Luftfeuchte (%) am Referenz Hochsommertag	60
Abbildung 34: Solarstrahlung (W/m ²) am Referenz Hochsommertag	61
Abbildung 35: Bewölkungsgrad (Achtel) am Referenz Hochsommertag	61
Abbildung 36: Windgeschwindigkeit (m/s) am Referenz Hochsommertag.....	62
Abbildung 37: Windrichtung (°) am Referenz Hochsommertag	62
Abbildung 38: 1D-Potentialtemperaturprofil (°C) am Referenz Hochsommertag	64
Abbildung 39: 1D-Feuchtigkeitsprofil (g/Kg) am Referenz Hochsommertag	64
Abbildung 40: 1D-Windgeschwindigkeitsprofil (m/s) am Referenz Hochsommertag	65
Abbildung 41: 1D-Turbulenzprofil TKE (m ² /s ²) am Referenz Hochsommertag	65

Abbildung 42: Auswirkung der Rasterauflösung (nach (Salata, et al., 2016))	67
Abbildung 43: Auswirkung der Modellgröße: Sensitivitätsstudie zur Bewertung die potenzielle Lufttemperatur in verschiedenen Höhen im Simulationsbereich	68
Abbildung 44: Verschiedene Parameter, die den menschlichen Wärmekomfort beeinflussen und in der PET-Skala berücksichtigt werden	71
Abbildung 45: PET-Komfortbewertungsskala Kategorien.....	72
Abbildung 46: Baumstandorte und -arten – Bestand Quelle: LHM	74
Abbildung 47: Baumstandorte und -arten - B-Plan 1926a Quelle: LHM.....	74
Abbildung 48: Baumstandorte und -arten - B-Plan 2147 Quelle: LHM, Vogt, Herzog de Meuron	74
Abbildung 49: P. Potenzielle Temperatur 14:00 - Bestand	75
Abbildung 50: P. Potenzielle Temperatur 14:00 - B-Plan 1926a	75
Abbildung 51: P. Potenzielle Temperatur 14:00 - B-Plan 2147	75
Abbildung 52: relative Luftfeuchtigkeit 14:00 - Bestand.....	76
Abbildung 53: rel. Luftfeuchtigkeit 14:00 - B-Plan 1926a.....	76
Abbildung 54: rel. Luftfeuchtigkeit 14:00 - B-Plan 2147.....	76
Abbildung 55: MRT 14:00 - Bestand	77
Abbildung 56: MRT 14:00 - B-Plan 1926a.....	77
Abbildung 57: MRT 14:00 - B-Plan 2147.....	77
Abbildung 58: Fassadenbegrünung B-Plan 2147 (Beispiel)	79
Abbildung 59: Oberflächentemperatur der Fassade: Blick von Westen.....	80
Abbildung 60: Oberflächentemperatur der Fassade: Blick von Südwesten	80
Abbildung 61: Oberflächentemperatur der Fassade: Blick von Süden	81
Abbildung 62: Oberflächentemperatur der Fassade: Blick von Norden	81
Abbildung 63: Potenzielle Temperatur Tagesprofil.....	84
Abbildung 64: Kühlungspotential (Potenzielle Temperatur) Tagesprofil	85

Abbildung 65: Potenzielle Temperatur 14:00 - Bestand	86
Abbildung 66: Potenzielle Temperatur 14:00 - B-Plan 1926a	86
Abbildung 67: Potenzielle Temperatur 14:00 - B-Plan 2147	86
Abbildung 68: Potenzielle Temperatur 22:00 - Bestand	87
Abbildung 69: Potenzielle Temperatur 22:00 - B-Plan 1926a	87
Abbildung 70: Potenzielle Temperatur - B-Plan 2147	87
Abbildung 71: Potenzielle Temperatur 04:00 - Bestand	88
Abbildung 72: Potenzielle Temperatur 04:00 - B-Plan 1926a	88
Abbildung 73: Potenzielle Temperatur 04:00 - B-Plan 2147	88
Abbildung 74: Menschlicher bioklimatischer Index PET Tagesprofil	89
Abbildung 75: Menschlicher bioklimatischer Index PET Gesamtstunden	90
Abbildung 76: Kühlungspotential (PET) Tagesprofil	91
Abbildung 77: PET 14:00 - Bestand	92
Abbildung 78: PET 14:00 - B-Plan 1926a	92
Abbildung 79: PET 14:00 - B-Plan 2147	92
Abbildung 80: PET 22:00 - Bestand	93
Abbildung 81: PET 22:00 - B-Plan 1926a	93
Abbildung 82: PET 22:00 - B-Plan 2147	93
Abbildung 83: PET 04:00 - Bestand	94
Abbildung 84: PET 04:00 - B-Plan 1926a	94
Abbildung 85: PET 04:00 - B-Plan 2147	94
Abbildung 86: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (20. Juli - 07:00)	96
Abbildung 87: Potenzielle Temperatur auf Dächern (20. Juli - 07:00)	97
Abbildung 88: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (20. Juli - 11:00)	98

Abbildung 89: Potenzielle Temperatur auf Dächern (20. Juli - 11:00)	99
Abbildung 90: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (20. Juli - 15:00).....	100
Abbildung 91: Potenzielle Temperatur auf Dächern (20. Juli - 15:00)	101
Abbildung 92: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (20. Juli - 19:00).....	102
Abbildung 93: Potenzielle Temperatur auf Dächern (20. Juli - 19:00)	103
Abbildung 94: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (20. Juli - 23:00).....	104
Abbildung 95: Potenzielle Temperatur auf Dächern (20. Juli - 23:00)	105
Abbildung 96: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (21. Juli - 03:00).....	106
Abbildung 97: Potenzielle Temperatur auf Dächern (21. Juli - 03:00)	107

Alle Abbildungen, die nicht als urheberfremde Quellen gekennzeichnet sind, sind solche des Gutachtenerstellers.

Zusammenfassung

Die Büschl Unternehmensgruppe plant die Errichtung eines neuen Stadtbausteins «Paketpostareal» im direkten Umgriff der denkmalgeschützten Paketposthalle im Münchener Westen. Das Areal soll mit einer blockartigen «Teppichbebauung», sowie mehreren

Hochpunkten und mit einer starken Nutzungsdurchmischung entwickelt werden. Die folgenden Studien konzentrieren sich auf drei unterschiedliche städtebauliche Situationen: den Ist-Zustand (Bestand), den bestehenden, rechtsgültigen Bebauungsplan Nr. 1926a, fortan als "B-Plan 1926a" bezeichnet, und den neuen Entwicklungsplan, vorgelegt von Herzog de Meuron Architekten, im Folgenden als "B-Plan 2147" bezeichnet.

Für das B-Plan-Verfahren wurde eine Studie durchgeführt, um die mikroklimatischen Auswirkungen aller drei Szenarien an einem heißen Sommertag zu untersuchen. In der Analyse wurde unter anderem die physiologische Äquivalenttemperatur (PET) [°C] als Messgröße verwendet, um die Auswirkungen der verschiedenen Gestaltungsmaßnahmen auf den menschlichen Wärmekomfort und das städtische Mikroklima zu bewerten.

Die Ergebnisse der 3 Simulationen stellen die unterschiedliche Entwicklung des Temperaturverlaufs über den untersuchten Sommertag dar und zeigen so die klimatische Wirksamkeit der Begrünungsmaßnahmen zur Verbesserung des thermischen Komforts. Die bestehenden Mikroklimabedingungen im bestehenden Areal (Bestand) und das Mikroklima des B-Plans 1926a sind relativ gleichwertig zu betrachten und erreichen einen maximalen PET von fast 50°C. Dies deutet darauf hin, dass die vorgeschlagenen Begrünungsmaßnahmen im B-Plan 1926a nicht ausreichend waren. Der neue B-Plan 2147 bietet bessere mikroklimatische Bedingungen und begrenzt den maximalen PET auf 47°C. Hier ist sicherlich die mikroklimatische Wirksamkeit der geplanten dichten Vegetation vorteilhaft. Diese beinhaltet den Erhalt des Baumbestandes, neue (Groß-)Baumpflanzungen, Dach- und Fassadenbegrünung und die generell geringere Flächenversiegelung im Vergleich zu den beiden anderen untersuchten Varianten. Die vorgesehenen Bäume verschatten das Areal großflächig und reduzieren so die Aufheizung über den Tag, die Dach- und Fassadenbegrünung reduziert durch die Evapotranspiration der Blätter die Oberflächentemperaturen im Vergleich zu nicht begrünten Fassaden- und Dachflächen. Darüber hinaus wird festgestellt, dass der B-Plan 2147 den PET-Komfort in den Morgen- bis späten Nachmittagsstunden deutlich verbessert, mit einem maximalen Kühleffekt von etwa 8°C zwischen 08:00 und 09:00 Uhr.

1 Einführung in die Mikroklima-Modellierung (ENVI-met)

Dieser Abschnitt bietet einen Überblick über das allgemeine Modellkonzept der Mikroklima-Simulationssoftware, die in der neuesten Ausgabe dieser Studie – ENVI-met, Version 5.6.1 – verwendet wird. Diese neue Version stellt mehrere Fortschritte gegenüber den vorherigen Versionen dar. Zu den relevanten Verbesserungen gegenüber den Vorgängerversionen, die das Potenzial für erhebliche Änderungen der Simulationsergebnisse haben, gehören:

1. Verbesserte Modellierung diffuser kurzwelliger Sonnenstrahlung (ACRT-Algorithmus) durch das Vegetationsdach – was zu einer besseren (höheren) solaren Transmission durch das Laubwerk führt (ENVI-met, 2024).
2. Verbesserte Modellierung der diffusen Kurzwellenstrahlung im Zusammenhang mit dem „Sky View Factor“ – was zu einer engeren Angleichung der Berechnung der „Mean Radiant Temperature“ (MRT) an VDI 3787 führt (ENVI-met, 2023).
3. Verbesserte Modellierung des langwelligen Strahlungsaustausches von Pflanzen (ENVI-met, 2024).
4. Verbesserte Koeffizientenberechnung an der Gebäude-/Bodenoberfläche, wodurch mehr Wärme von den Oberflächen an die Luft übertragen wird. Daher ist der modellierte Lufttemperaturanstieg für versiegelte Gebiete jetzt größer als zuvor (ENVI-met, 2024).
5. Verbesserung der Berechnung der langwelligen Strahlung, die sich hauptsächlich auf nächtliche städtische Wärmeinseln auswirkt und die MRT-Genauigkeit verbessert (ENVI-met, 2024).

In den folgenden Abschnitten werden die relevanten mathematischen Methoden und physikalischen Gleichungen beschrieben, die im ENVI-met-Modell verwendet werden.

1.1 Allgemeine Modellbeschreibung

ENVI-met ist ein hochmodernes prognostisches, nicht-hydrostatisches, dreidimensionales Klimamodell. Der wesentliche Unterschied zwischen ENVI-met und großräumigen Atmosphärenmodellen, wie sie für die Erstellung des Münchner Stadtklimaatlas verwendet werden, liegt in der zeitlichen und räumlichen Auflösung. Mit einer typischen räumlichen Auflösung von 0,5 m bis 10 m und internen Zeitschritten von ≤ 10 s modelliert ENVI-met die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Boden, Vegetation und Gebäuden auf einer Mikroskala. Dies ermöglicht die explizite Simulation jeder einzelnen Anlage und städtischen Struktur, was ENVI-met zu einem wertvollen Werkzeug im Stadtplanungsprozess macht, um die Auswirkungen verschiedener Designeingriffe auf das Mikroklima zu bewerten. Es ist besonders effektiv beim Verständnis der Rückkopplung zwischen der gebauten Umwelt (z. B. Gebäuden und undurchlässigen Flächen) und der Vegetation in Straßenschluchten, Innenhöfen, Plätzen und anderen städtischen Gebieten (Bruse & Fleer, 1998) (Huttner, 2012) (Forouzandeh, 2018).

Die verschiedenen Oberflächen-Pflanzen-Luft-Interaktionsprozesse, die in einer städtischen Umgebung auftreten, werden von ENVI-met detailliert modelliert, einschließlich, aber nicht beschränkt auf:

1. Lufttemperatur
2. Luftfeuchtigkeit
3. einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung (direkt + diffus + reflektiert)
4. gegenseitige Verschattung der Gebäude bei Sonneneinstrahlung
5. Emission langwelliger Strahlung
6. Einfluss der Oberflächenalbedo (d. h. des Reflexionsgrades)
7. Einfluss der thermischen Masse verschiedener Materialien (z. B. Straßen, Gehwege, Boden etc.)
8. Oberflächentemperatur & Energieflüsse verschiedener Oberflächen, (z.B. Straßen, Gehwege, Gras, Bäume etc.)
9. Einfluss der städtischen Bebauung (z. B. Gebäude, Bäume etc.) auf Windgeschwindigkeit & -richtung
10. Wärme- und Wasserhaushalt des Bodens bis zu einer Tiefe von 10 m
11. Evapotranspirationskühlung und Beschattung durch Bäume und andere Vegetation

Die Simulationszeitschritte wurden für die verschiedenen Berechnungsmodelle unterschiedlich gewählt, um die Simulationsdauer zu optimieren (15 min für das Strahlungsmodell, 15 min für Pflanzenmodelle, sowie 30 min für das Windmodell).

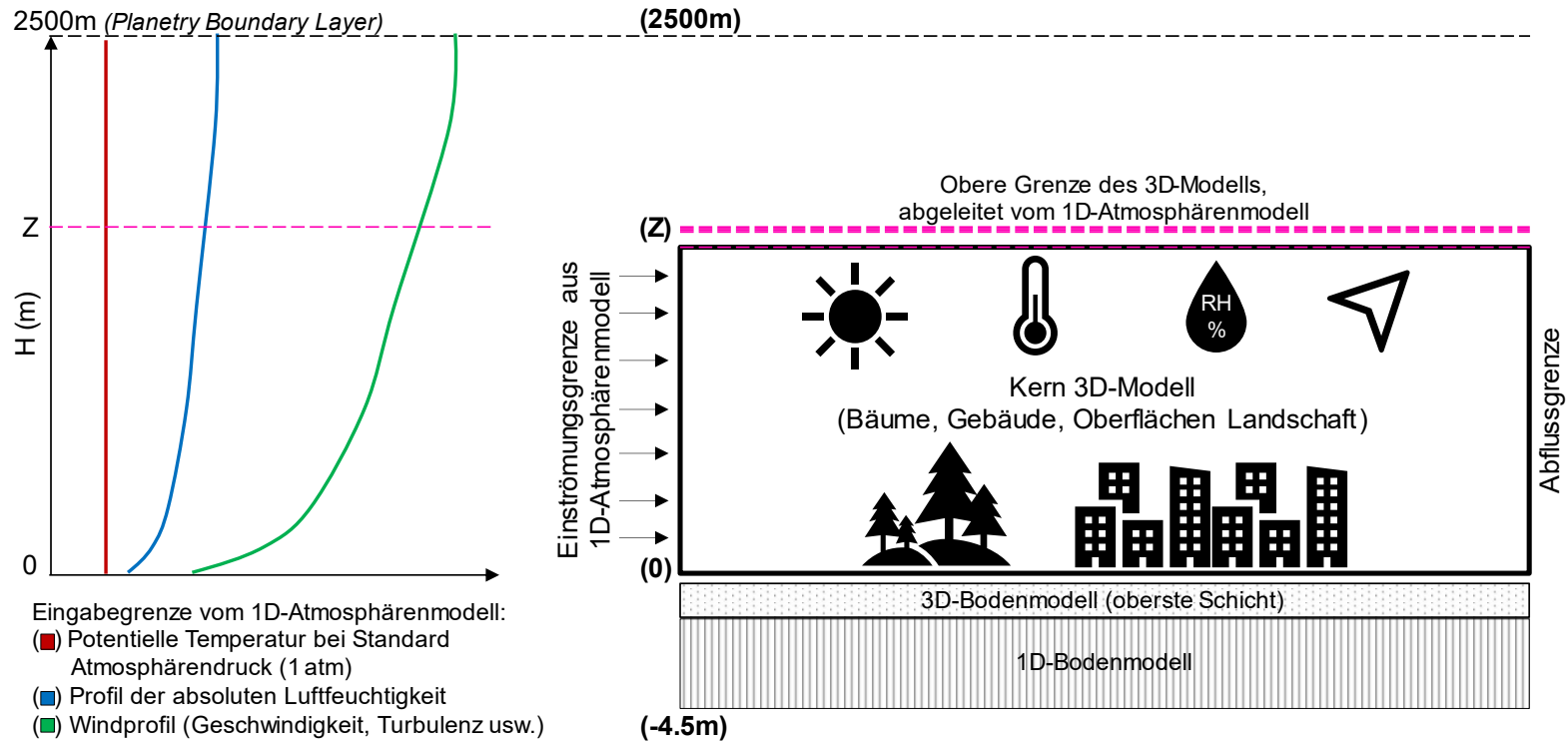


Abbildung 1: Überblick über die drei ENVI-met Submodule (1D-Atmosphärenmodell, Hybrid 1D-3D-Bodenmodell, Kern 3D-Modell) Quelle: Huttner

Das ENVI-met-Modell besteht aus mehreren Teilmodellen (Abbildung 1), die miteinander interagieren (Huttner, 2012):

1.1.1 1D-Atmosphäregrenzmodell

Das eindimensionale Randmodell wird hauptsächlich zur Initialisierung des Modells und zur Festlegung der Randbedingungen für das dreidimensionale Atmosphärenmodell verwendet. Es erstreckt sich vom Bodenniveau ($z=0$) bis zu einer Höhe von 2500 Metern über dem Boden – der typischen Höhe der planetaren Grenzschicht und sorgt so für stabile laminare Bedingungen für die Stabilität des Modells (Huttner, 2012).

Temperatur Profil:

Da es sich bei ENVI-met um ein nicht-hydrostatisches Modell handelt, geht es davon aus, dass der Referenzdruck des Modells, dem der Standardatmosphäre entspricht, d. h. 1013,25 HPa. Da die für die Simulation tatsächlich verwendete Wetterstation möglicherweise einen anderen Luftdruck aufweist (z. B. weisen die in dieser Studie verwendeten DWD-Wetterdaten für München einen Luftdruck von 950 HPa auf), wird die Lufttemperatur der Wetterstation in die potenzielle Temperatur umgerechnet Referenzdruck der Standardatmosphäre unter Verwendung der folgenden Gleichung:

$$\theta_{(Kelvin)} = T_{air(DBT,Kelvin)} * \left(\frac{1000}{Station\ Barometric\ Pressure_{(HPa)}} \right)^{\frac{R}{c_P}}$$

wobei; $\theta_{(Kelvin)}$ = *Potenzielle Temperatur bei Referenzdruck des Modells (d.h. Standard-Atmosphäre) in Kelvin*

$T_{air(DBT,Kelvin)}$ = *Lufttemperatur oder "Dry Bulb Temperature", die an der meteorologischen Station in Kelvin gemessen wird*

$Station\ Barometric\ Pressure_{(HPa)}$ = *An der meteorologischen Station in HPa gemessener Luftdruck*

$$\frac{R}{c_P} = 2 / 7 = 0.286$$

Wie in Abbildung 1 dargestellt, geht ENVI-met standardmäßig von einer neutral geschichteten Atmosphäre aus, daher wird davon ausgegangen, dass die potenzielle Temperatur für das 1D-Zuflussprofil (0 bis 2500 m) mit der Höhe konstant ist (Huttner, 2012). Die folgende Gleichung quantifiziert die Annahme einer neutralen atmosphärischen Schichtung:

$$Neutral\ Atmospheric\ Stratification: \quad \frac{\partial \theta_{(Kelvin)}}{\partial z} = 0 \quad or \quad \frac{\partial T_{air(DBT,Kelvin)}}{\partial z} = -\frac{g}{c_P} \approx \frac{0.65\ K}{100\ m}$$

Wenn andere mesoskalige Phänomene der atmosphärischen Grenzschicht wie Temperaturinversion usw. berücksichtigt werden sollen, müssen Eingabedaten auf andere Weise wie WRF-Simulationen oder Radiosondenmessungen ermittelt und manuell auf das 1D-Zuflussprofil angewendet werden (Salata, et al., 2016). Dieses Phänomen wurde jedoch im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt.

Feuchtigkeitsprofil:

Die gemessenen meteorologischen Wetterdatensätze liefern typischerweise relative Luftfeuchtigkeit in einer Höhe von 2 m über dem Boden. Um ein 1D-Profil für die spezifische Luftfeuchtigkeit in g/kg zu erstellen, wird die spezifische Luftfeuchtigkeit auf der Stationshöhe und in einer Höhe von 2500 m von ENVI-met berechnet und eine lineare Interpolation wird verwendet, um das Profil für die gesamte Höhe zu erstellen (Forouzandeh, 2018).

Unter der Annahme der neutral geschichteten Normalatmosphäre beträgt die durchschnittliche Lufttemperaturabnahme alle 100 Meter 0,65°C. Aus diesem Zusammenhang wird im ersten Schritt die Lufttemperatur in 2500 m Höhe berechnet, wie in der folgenden Gleichung dargestellt (Mennerich, 2016):

$$T_{air,H} = T_{air,B} - \frac{H}{100} \times 0.65 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

wobei; $T_{air,B}$ = Gemessene Lufttemperatur über dem Boden (d.h. 2 m)

H = Gewünschte Höhe über Grund (z. B. 2500 m)

Im zweiten Schritt wird die Taupunkttemperatur auf 2500 m wie folgt abgeleitet (Mennerich, 2016):

$$T_{Dew,H} = T_{Dew,B} - \frac{H}{100} \times 0.18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Als dritten Schritt wird, wenn die Lufttemperatur und der Taupunkt auf 2500 m bekannt sind, die relative Luftfeuchtigkeit in dieser Höhe gemäß der unten angegebenen Gleichung von (Wanielista, et al., 1997) berechnet und schließlich in spezifische Luftfeuchtigkeit umgewandelt (g/Kg), um das 1D-Profil zu erstellen.

$$RH = 100 \left(\frac{112 - 0.1T_{air}T_{Dew}}{112 + 0.9T_{air}} \right)$$

Windprofil:

Die Windgeschwindigkeit wird in Bodennähe (0 m) immer mit 0 m/s angenommen (Haftbedingung). Die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe wird als Eingabe von der Wetterstation bereitgestellt. Die Windgeschwindigkeit zwischen 0 und Eingangshöhe (d. h. 10 m) wird dann mithilfe eines logarithmischen Profils basierend auf den Oberflächenrauheitseigenschaften interpoliert. Die Windgeschwindigkeit zwischen Eingangshöhe (d. h. 10 m) bis zur Höhe der planetaren Grenzschicht (angenommen 2500 m) wird linear interpoliert, um das vollständige 1D-Windgeschwindigkeitsprofil zu erzeugen. Das 1D-Profil für die Turbulenzparameter (TKE, Richardson-Nummer usw.) wird basierend auf dem 1D-Windgeschwindigkeitsprofil berechnet.

Die Windrichtung wird als Eingabe von der meteorologischen Wetterstation bereitgestellt und als konstant mit der Höhe angenommen (Huttner, 2012).

1.1.2 Hybrides 1D-3D-Bodenmodell

Mit dem Bodenmodell werden Temperatur- und Feuchtigkeitsflüsse natürlicher Böden oder künstlicher Dichtungsmaterialien bis zu einer Tiefe von 4,5 m berechnet (ENVI-met, 2024). Die oberste Schicht des 3D-Gitterbodenmodells ist die einzige Schicht, in der vollständige 3D-Flüsse berechnet werden. Für alle unteren Bodenschichten werden die Temperatur- und Feuchtigkeitsflüsse als einzelne vertikale 1D-Profilsäulen ohne horizontalen Austausch behandelt (Bruse, 2004), (Huttner, 2012).

Das Bodenprofil wird mit insgesamt 19 Einzelschichten unterschiedlicher Tiefe modelliert. Während die oberste Schicht mit einer Dicke von 1 cm mit vollständigen 3D-Flüssen modelliert wird, werden die restlichen 18 Schichten als 1D-vertikale Bodenprofilsäulen unterschiedlicher Tiefe modelliert: von 1 cm bis 50 cm für die unterste Schicht (Abbildung 2).

Zur Modellinitialisierung können die anfängliche Bodentemperatur (°C) und die Bodenfeuchtigkeit (%) für vier verschiedene Bodenschichtgruppen definiert werden:

- i. Obere Schicht (0-20 cm)
- ii. Mittelschicht (20-50 cm)
- iii. Tiefe Schicht (50-200 cm)
- iv. die Grundgesteinsschicht (unter 200 cm)

Die Bodenfeuchtigkeit wird in „Nutzbare Feldkapazität“ angegeben („Nutzbare Feldkapazität = Feldkapazität – Welkepunkt“).

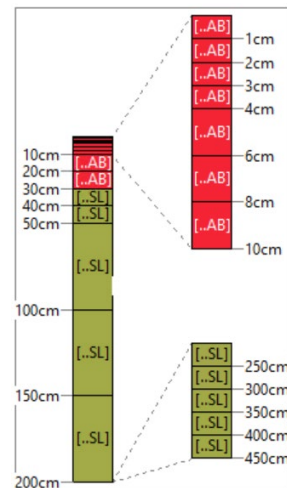


Abbildung 2: Vertikale Schichten eines typischen Bodenprofils in ENVI-met

Die Bodentemperatur T_s und der volumetrische Wassergehalt η werden berechnet als:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = D_\eta \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} + \frac{\partial K_\eta}{\partial z} - S_\eta(z)$$

Die Temperaturleitfähigkeit K_η ist für undurchlässige Böden konstant und für alle anderen Böden eine Funktion der Bodenfeuchte η (berechnet basierend auf der Methodik von (Tjernström, 1989)). *Alle anderen hydraulischen Parameter wie der volumetrische Wassergehalt η , dessen Sättigungswert η_s , die hydraulische Leitfähigkeit K_η und die hydraulische Diffusivität D_η werden mit den von (Clapp & Hornberger, 1978) angegebenen Formeln berechnet.*

Zusätzlich wird die vom Vegetationsmodell bereitgestellte Wasseraufnahme durch die Pflanzenwurzeln (S_η) als interne Feuchtigkeitssenke betrachtet.

Schließlich berücksichtigen die oberen Schichten des Bodenmodells die Verdunstung oder Kondensation, indem sie als externe Senke oder Quelle für den Dampffluss betrachtet werden. Dabei kommt das Ähnlichkeitsgesetz von Monin und Obhukov zum Einsatz:

$$J_q^0 = u_* q_*$$

Wobei; u_* = Skalierung der Impulsgeschwindigkeit (Reibungsgeschwindigkeit)

q_* = Skalierung der Dampfgeschwindigkeit

1.1.3 3D-Atmosphärenmodell (d. h. der Kernsimulationsbereich)

Das Kernmodell der 3D-Atmosphäre wird in den folgenden Abschnitten detaillierter beschrieben.

1.2 3D-Atmosphärenmodell: Luftstrom (CFD)

1.2.1 Mittlerer Luftstrom

Das Grundkonzept zur Beschreibung dreidimensionaler turbulenter Strömungen wird durch die nicht-hydrostatische inkompressible Navier-Stokes-Gleichung gegeben. Zur weiteren Vereinfachung wird die Boussinesq-Näherung verwendet, um die Dichte ρ aus der Navier-Stokes-Gleichung zu eliminieren, was zu einem zusätzlichen Quellterm in der w -Gleichung führt, um die thermisch erzwungene Vertikalbewegung einzubeziehen, und zu einer Kontinuitätsgleichung, die für jeden Zeitschritt erfüllt werden muss, um die Modellmasse erhalten zu halten. (Bruse & Fleer, 1998).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} = - \frac{\partial p'}{\partial x} + K_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} = - \frac{\partial p'}{\partial y} + K_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) + f(v - u_g) - S_v$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} = - \frac{\partial p'}{\partial z} + K_m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

In den obigen Gleichungen ist p' die gesamte lokale Druckstörung, K_m der lokale Austauschkoefizient, und θ die potentielle Temperatur auf der Ebene z . Die Referenztemperatur θ_{ref} sollte die durchschnittlichen meso-skaligen Bedingungen darstellen und wird durch ein eindimensionales Modell bereitgestellt, das parallel zum Kernmodell läuft (siehe Abschnitt 1.1.1). $S_{u(i)}$ -terme beschreiben den Verlust der Windgeschwindigkeit aufgrund der Widerstandskräfte der Vegetation (siehe Abschnitt 1.3.1).

f ist der Coriolis-Parameter, der die Rotation des Windes in Bodennähe im Vergleich zu den geostrophischen Windkomponenten u_g and v_g beschreibt, die entweder als 104sec^{-1} angenommen werden kann (Bruse & Fleer, 1998) oder mit der folgenden Gleichung berechnet werden kann. Der Coriolis-Parameter ist in ENVI-met implementiert, aber standardmäßig ausgeschaltet (Huttner, 2012).

$$f = 2\Omega\sin\varphi$$

wobei; $\Omega = 7 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ ist die Pulsation der Erdrotation

φ = Breitengrad des Standorts des Modells

1.2.2 Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Die Verteilung der Temperatur θ und der spezifischen Luftfeuchtigkeit q innerhalb der Atmosphäre ergibt sich aus der kombinierten Advektions-Diffusionsgleichung mit internen Quellen/Senken:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = K_h \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} \right) + \frac{1}{c_p \rho} \frac{\partial R_{n,lw}}{\partial z} + Q_h + S_\theta(x_i)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = K_q \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2} \right) + Q_q + S_q(x_i)$$

Die berechneten Oberflächen-, Wand- und Dachtemperaturen werden an allen physikalischen Grenzen verwendet. $\partial R_{n,lw}/\partial z$ ist die vertikale Divergenz der langwelligen Strahlung unter Berücksichtigung der kühlenden und wärmenden Wirkung der Strahlungsströme. Das zuvor beschriebene 1D-Modell (Abschnitt 1.1.1) wird zur Berechnung des Zuflussprofils und der oberen Grenze verwendet. An den Abflussgrenzen wird eine Nullgradientenbedingung verwendet (Bruse, 2004).

ENVI-met modelliert nicht den Phasenübergang zwischen Wasser und Wasserdampf und umgekehrt. Dies bedeutet, dass die relative Luftfeuchtigkeit immer unter 100 % liegt (Huttner, 2012).

Ähnlich wie die Impulsgleichungen werden Q_h und Q_q verwendet, um den Wärme- und Dampfaustausch an der Pflanzenoberfläche mit dem Atmosphärenmodell zu verknüpfen.

$S_\theta(x_i)$ und $S_q(x_i)$ sind die Quelle-/Senke-Begriffe, die verwendet werden, um den Wärme- und Dampfaustausch von einer grünen Wandoberfläche einzubeziehen.

1.2.3 Turbulenz und Austauschprozesse

In ENVI-met wird ein RANS-Turbulenzmodell der Ordnung 1,5 verwendet. Basierend auf der Arbeit von (Yamada & Mellor, 1975) werden dem Modell zwei zusätzliche Prognosevariablen hinzugefügt: die lokale Turbulenz (E) und ihre Dissipationsrate (ϵ). Ihre Verteilung wird durch den Prognosegleichungssatz angegeben:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = K_E \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_i^2} \right) + Pr - Th + Q_E - \epsilon$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = K_\epsilon \left(\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x_i^2} \right) + c_1 \frac{\epsilon}{E} Pr - c_3 \frac{\epsilon}{E} Th + c_2 \frac{\epsilon^2}{E} + Q_\epsilon$$

Die mechanische Produktion Pr wird mithilfe des dreidimensionalen Deformationstensors des lokalen Windfelds parametrisiert:

$$Pr = K_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad \text{mit } i, j = 1, 2, 3$$

Der Auftriebsproduktionsterm Th ist gegeben durch:

$$Th = \frac{g}{\theta_{ref}(z)} K_h \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

$\theta_{ref}(z)$ ist die potentielle Temperatur an der Zuflussgrenze in der Höhe z . Zur Kalibrierung der ε -Gleichung wurden die Standardwerte $c_1 = 1,44$ $c_2 = 1,92$ und $c_3 = 1,44$ gegeben durch (Launder & Spalding, 1974) verwendet.

Q_E und Q_ε sind die lokalen Quellterme für die Turbulenzerzeugung und -dissipation an der Vegetation, die in Abschnitt 1.3.1 näher erläutert werden.

Aus dem berechneten E- ε -Feld werden die turbulenten Austauschkoeffizienten unter der Annahme lokaler Turbulenzisotropie unter Verwendung der folgenden Beziehungen berechnet:

$$K_m = c_\mu \frac{E^2}{\varepsilon} \quad ; \quad K_H, K_q = 1.35 \cdot K_m \quad ; \quad K_E = \frac{K_m}{\sigma_E} \quad ; \quad K_\varepsilon = \frac{K_m}{\sigma_\varepsilon}$$

Wobei $c_\mu = 0.09$; $\sigma_E = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$

Randbedingungen: An allen festen Oberflächen werden E und ε als Funktion der lokalen tangentialen Reibungsgeschwindigkeit u_* berechnet, die unter Verwendung der Strömungskomponenten tangential zur betreffenden Oberfläche berechnet wird:

$$E(z=0), E_w = \frac{(u_*^2)^{tan}}{\sqrt{c_\mu}} \quad ; \quad \varepsilon(z=0), \varepsilon_w = \frac{(u_*^3)^{tan}}{\kappa z_0}$$

Wobei κ = von-Karman-konstant (=0.4)

z_0 = mikroskalige Rauheitslänge der Oberfläche

1.3 3D-Atmosphärenmodell: Vegetation

Die Vegetation in ENVI-met interagiert mit dem Atmosphärenmodell sowie mit dem Boden- und dem Strahlungsmodell. Die Vegetation wird durch Zellcluster dargestellt, die im Atmosphärenmodell eine Blattflächendichte „*Leaf Area Density*“ (LAD) und im Bodenmodell eine Wurzelflächendichte „*Root Area Density*“ (RAD) aufweisen. Um dies zu erreichen, ermöglicht ENVI-met die Modellierung der Vegetation auf zwei Arten: „*Simple* Pflanzen“ und „3D-Pflanzen“ (Simon, 2016).

Gräser, Mais, Hecken und andere Pflanzen, die nur eine einfache vertikale Struktur aufweisen, also keine überhängenden Kronen haben, werden als sogenannte „*Simple* Pflanzen“ modelliert. Die Blattflächendichte (LAD) „*Simple* Pflanzen“ wird durch ein 1D-Profil von 10 Schichten in der Atmosphäre dargestellt, während die Wurzeln aus einem ähnlichen 1D-Profil von 10 Schichten Wurzelflächendichte (RAD) im Bodenmodell bestehen.

Pflanzen mit einem komplexeren Kronendach, wie etwa Bäume, werden durch Zellcluster dargestellt, die über eine LAD und eine RAD verfügen und so eine dreidimensionale Form der Pflanze liefern. Da diese Pflanzen ihre eigene dreidimensionale Geometrie besitzen, werden sie als „3D-Pflanzen“ bezeichnet. Dieses Modell ermöglicht die Bewertung der Auswirkungen von Pflanzen auf das Mikroklima sowie der umgekehrten Auswirkungen des Mikroklimas auf die Vegetation. Die einzelnen Cluster von LAD-Zellen werden zusammengeführt, um einen Teil eines größeren Objekts zu bilden, nämlich des Vegetationskronendachs. Dies wird als „Pflanze-als-Objekt“-Modell bezeichnet und ermöglicht die Aggregation der auf der Ebene der einzelnen Blätter berechneten Prozesse, wie sie in den folgenden Abschnitten beschrieben werden, zurück zur zugehörigen Pflanze. Einige Beispiele für aggregierte Kronendacheffekte sind:

$$J_{trans}^{sum} = \iiint_{C(X,Y,Z)} LAD(x,y,z) \cdot \rho_{air} \cdot j_{f,trans}(x,y,z) dx dy dz$$

$$J_{evap}^{sum} = \iiint_{C(X,Y,Z)} LAD(x,y,z) \cdot \rho_{air} \cdot j_{f,evap}(x,y,z) dx dy dz$$

Wobei; J_{trans}^{sum} = die gesamte Transpirationsmenge der Baumkronen in $[g(H_2O) s^{-1}]$

J_{evap}^{sum} = die gesamte Verdunstungsmenge der Baumkronen in $[g(H_2O) s^{-1}]$

$C(X,Y,Z)$ = dreidimensionaler Raum der Baumkrone

LAD = "Leaf Area Density" innerhalb der Baumkrone bei Zelle (x,y,z)

ρ_{air} = Luftdichte

$j_{f,trans}$ = lokaler Transpirationsfluss im Blattmaßstab

Anders als die LAD-Zellen wird die dreidimensionale Wurzelstruktur implizit durch eine kleine Anzahl von Parametern definiert. Die vertikale Verteilung der Wurzeln wird durch ein 1D-Profil der Wurzelflächendichte $RAD(z)$ bestimmt, das von der Oberfläche $z = 0$ bis zum tiefsten Teil der Wurzel bei $z = R_z$ reicht. Um vertikale Verteilungsmuster zu ermöglichen, wird das Wurzelprofil in 10 äquidistante Schichten unterteilt, die die Wurzelfläche in den Schichten der Tiefe $1 \cdot R_z/10, 2 \cdot R_z/10, \dots, 10 \cdot R_z/10$ darstellen. Die tatsächliche Menge an Wurzelflächenfläche „Root Surface Area“ RSA in jeder Schicht wird durch die Wurzelflächendichte der Schicht $RAD(z)$ und ihre horizontale Ausdehnung berechnet, die durch einen Radius R_{xy} definiert wird. Der Radius der Wurzel kann für jede der 10 vertikalen Schichten der Wurzel individuell angepasst werden (siehe Abbildung 3). Die RSA einer Schicht stellt nichts anderes als einen Gewichtungsfaktor dar, um

den Anteil der Wurzelflächenfläche für jede vertikale Schicht zu berechnen. Die RSA eines Baums kann daher als Funktion der RAD geschrieben werden als:

$$RSA^{tree} = \iiint_{R(X,Y,Z)} RAD(x,y,z) dx dy dz$$

Wobei; $R(X,Y,Z)$ = dreidimensionaler Wurzelzonenraum, der von den Wurzeln des Baumes eingenommen wird

Soil Layer	Root Area Density	Root Range from center	Max (1.00) = 2.50 m	% RS
RAD Level 0 (-0.00 to -0.50 m):	0.100		(1.00) = 2.50 m	15%
RAD Level 1 (-0.50 to -1.00 m):	0.100		(1.00) = 2.50 m	15%
RAD Level 2 (-1.00 to -1.50 m):	0.100		(0.96) = 2.40 m	14%
RAD Level 3 (-1.50 to -2.00 m):	0.100		(0.88) = 2.20 m	13%
RAD Level 4 (-2.00 to -2.50 m):	0.100		(0.80) = 2.00 m	12%
RAD Level 5 (-2.50 to -3.00 m):	0.100		(0.72) = 1.80 m	11%
RAD Level 6 (-3.00 to -3.50 m):	0.100		(0.59) = 1.47 m	9%
RAD Level 7 (-3.50 to -4.00 m):	0.100		(0.44) = 1.10 m	7%
RAD Level 8 (-4.00 to -4.50 m):	0.100		(0.29) = 0.72 m	4%
RAD Level 9 (-4.50 to -5.00 m):	0.100		(0.00) = 0.00 m	0%

Abbildung 3: Definition der 3D-Wurzelstruktur eines Baumes in Simulationssoftware Quelle: Envimet

1.3.1 Luftstrommodellierung durch Vegetationsdach

Die lokalen Quell-/Senkenterme S_u , S_v und S_w in der Navier-Stokes-Gleichung aus Abschnitt 1.2.1 beschreiben den Verlust der Windgeschwindigkeit aufgrund von Widerstandskräften durch halbdurchlässige Hindernisse, d. h. Vegetationselemente. Nach (Liu, 1997) und (Yamada, 1982) kann dieser Effekt wie folgt parametrisiert werden:

$$S_{u(i)} = \frac{\overline{\partial p'}}{\partial x_i} = c_{d,f} LAD(z) \cdot W \cdot u_i$$

wobei; $W = (u^2 + v^2 + w^2)^{0.5}$ ist die mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe z

$LAD(z)$ ist die (*Leaf Area Density*) Blattflächendichte in m^2m^{-3} der Pflanze in dieser Höhe

$c_{d,f} = 0.2$ ist der mechanische Widerstandskoeffizient an Anlagenelementen

Zur Modellierung von Turbulenzen werden dem E- ϵ -Turbulenzsystem, das zuvor in Abschnitt 1.2.3 besprochen wurde, zwei zusätzliche Quellterme hinzugefügt – Q_E und Q_ϵ (Bruse, 2004).

$$Q_E = c_{d,f} LAD(z) \cdot W^3 - 4 c_{d,f} LAD(z) \cdot |W| \cdot E$$

$$Q_\epsilon = 1.5 c_{d,f} LAD(z) \cdot W^3 - 6 c_{d,f} LAD(z) \cdot |W| \cdot \epsilon$$

Der Q_E -Term berücksichtigt die Turbulenzerzeugung bei Vegetation. Der Q_ϵ -Term modelliert die Turbulenzerstörung aufgrund der Kaskade von größeren, durch Scherkräfte verursachten Wirbeln zu kleineren und schwächeren Wirbeln auf der Kolmogorov-Beziehung (Launder & Spalding, 1974). Dies basiert auf der Arbeit von (Liu, et al., 1996) & (Wilson, 1988).

1.3.2 Vegetationsphysiologie: Photosynthese und Stomata-Leitfähigkeit im Blattmaßstab

Neben den Auswirkungen der Vegetationszellcluster auf das Windfeld nutzen die in ENVI-met modellierten Pflanzen biologische Kontrollmechanismen, die den Austausch von CO₂ und Wasserdampf mit der Atmosphäre regulieren (Simon, 2016). Die Grundgleichung für die Aufnahme und Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre aufgrund von Assimilations- und Atmungseffekten der Vegetation kann wie folgt geschrieben werden (Bruse, 2004):

$$\frac{\partial[CO_2]}{\partial t} + u_i \frac{\partial[CO_2]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{x,CO_2} \frac{\partial[CO_2]}{\partial x_i} \right) + Q_{x,CO_2}(x, y, z)$$

Das anfängliche CO₂-Feld wird aus der angegebenen Hintergrundkonzentration in [ppm] unter Verwendung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit in etwa 2 m Entfernung vom 1D-Atmosphärenmodell übernommen.

Die Einheit von [CO₂] in der atmosphärischen Prognosegleichung ist [mgkg⁻¹], während im Pflanzensystem CO₂ in [ppm] benötigt wird. Die folgende Umrechnung zwischen den verschiedenen Einheiten wird verwendet:

$$ppm \leftarrow \frac{1}{\phi_{CO_2}} \leftarrow \frac{mg}{m^3} \rightarrow \frac{1}{\rho} \rightarrow \frac{mg}{kg} \rightarrow \frac{\rho}{\phi_{CO_2}} \rightarrow ppm$$

$$\phi_{CO_2} = \frac{M_{CO_2} \cdot \rho_{air,vapour}}{M_{air}} \cong 1.96$$

Wobei; M_{CO_2} = Molekularmasse von CO₂ (44 g mol⁻¹)

M_{air} = Molekularmasse von Umgebungsluft (28.9 g mol⁻¹)

$$\rho_{air,vapour} = \frac{P}{R_{air} \cdot x}$$

P = Luftdruck in [Pa]

$$x = T_{air,2m} \left(1 + R' \cdot \frac{q_{air, 2m}}{1000} \right)$$

$$R' = \frac{R_v}{R_a} - 1 ; \text{ mit } R_a = 287.05 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ (Gaskonstante für Umgebungsluft); } R_v = 461.51 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ (Gaskonstante für Dampf)}$$

Der CO₂-Austauschkoeffizient K_{x,CO_2} wird aus dem Koeffizienten für Wasserdampf K_v unter Berücksichtigung der unterschiedlichen molekularen Diffusionskoeffizienten in der Luft berechnet:

$$K_{x,CO_2} = 0.625 K_v$$

Der Quelle/Senke-Term $Q_{x,CO_2}(x, y, z)$ ist mit der Nettoassimilation der Pflanzen wie folgt verknüpft:

$$Q_{x,CO_2}(x, y, z) = -A_n \cdot LAD(x, y, z) \cdot \frac{1}{\rho}$$

Wobei; A_n ist die Netto-Photosyntheserate (positive zum Blatt) d.h. CO₂-Fluss pro Blattflächeneinheit

Zur Berechnung der Netto-Photosyntheserate verwendet ENVI-met das sogenannte A-gs-Modell. Ausgangspunkt für A – g_s – Modelle sind Beobachtungen, die eine starke Korrelation zwischen der Photosyntheserate A_n und der stomatären Leitfähigkeit g_s zeigen (Jacobs, 1994). Der wichtigste Faktor ist die Modellierung der sogenannten Stomata – kleine Öffnungen im Blatt, die den Austausch von Gasen zwischen Luft und Blatt ermöglichen (Bruse, 2004) (Huttner, 2012).

Die Haupthypothese des A-gs-Modells ist, dass das Ziel von Pflanzen darin besteht, die stomatäre Leitfähigkeit so zu steuern, dass der Wasserverlust der Pflanze minimiert wird, die CO₂-Assimilation und damit der Kohlenstoffgewinn maximiert werden (Bruse, 2004). Der stomatären Widerstand r_s (oder Leitwert g_s) von Pflanzen ist ein Maß für den Grad der Öffnung der Stomata. Ein korrektes Modell für das Stomataverhalten muss in der Lage sein, sowohl die Auswirkungen kurzfristiger Schwankungen (Licht, Temperatur) als auch langfristiger Veränderungen (z. B. Anstieg des atmosphärischen CO₂) bei der Berechnung der Transpiration der Pflanzen zu berücksichtigen.

Eine solche Methode zur Berechnung der stomatalen Leitfähigkeit ist Jacobs' $A - g_s - Modelle$ (Jacobs, 1994), das auf der Arbeit von (Goudriaan, et al., 1985) basiert und die Photosyntheserate A_n in Kombination mit der stomatalen Leitfähigkeit g_s [mm s^{-1}] einer Pflanze verwendet, um ihre Evapotranspiration zu berechnen (Huttner, 2012).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Modellierung der Netto-Photosyntheserate in ENVI-met drei einschränkende Faktoren berücksichtigt:

1. Unzureichendes CO_2
2. Unzureichende Strahlung (PAR)
3. Wasserstress im Boden (nach (Calvet, et al., 1998))

Es muss beachtet werden, dass die Auswirkung der Bodentemperatur auf die Wasseraufnahme der Wurzeln derzeit nicht in ENVI-met modelliert wird.

Schritt 01

Im ersten Schritt wird die Temperaturabhängigkeit der Photosynthese durch die Verwendung temperaturabhängiger Skalierungsfunktionen (sogenannte Q_{10} -Funktionen) für die folgenden drei Variablen berücksichtigt:

CO_2 -Ausgleichskonzentration (τ):

Die CO_2 -Ausgleichskonzentration, d. h. der Zustand, bei dem der CO_2 -Einstrom durch Assimilation genau durch den CO_2 -Ausstrom durch Atmungsprozesse ausgeglichen wird (d. h. $A_n = 0$) (Jacobs, 1994).

$$\tau(T) = \tau(@25) Q_{10}^{(T - 25)/10}$$

Wobei, T = Umgebungstemperatur in °C

$\tau(@25)$ ist der Referenzwert von τ bei $T = 25^\circ\text{C}$, angegeben in Tabelle 1

Mesophyll-Leitfähigkeit einschließlich Bodenwasserstress (g_m):

$$g_m = \phi_{\text{water}} \cdot g'_m$$

Wobei, ϕ_{water} ist die Wasserzugang durch Pflanzenwurzeln als Funktion des Bodenwasserstress

g'_m ist die Mesophyll-Leitfähigkeit aus dem Original-Jacobs-Modell

$$g'_m(T) = \frac{g'_m(@25) Q_{10}^{(T-25)/10}}{(1 + \text{EXP}(0.3 (T_1 - T)))(1 + \text{EXP}(0.3 (T - T_2)))}$$

Wobei, T = Umgebungstemperatur in °C

$g'_m(@25)$ ist der Referenzwert von g'_m bei $T = 25^\circ\text{C}$, angegeben in Tabelle 1

Maximale Photosyntheserate bei Lichtsättigung ($A_{m,max}$):

$$A_{m,max}(T) = \frac{A_{m,max}(@25) Q_{10}^{(T-25)/10}}{(1 + \text{EXP}(0.3 (T_1 - T)))(1 + \text{EXP}(0.3 (T - T_2)))}$$

Wobei, T = Umgebungstemperatur in $^{\circ}\text{C}$

$A_{m,max}(@25)$ ist der Referenzwert von $A_{m,max}$ bei $T = 25^{\circ}\text{C}$, angegeben in Tabelle 1

Tabelle 1: Parameter der Q10-Funktionen für C3- und C4-Pflanzen (Jacobs, 1994)

	Parameter	(@25)	Q_{10}	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$
C3	$\varepsilon_0 [mgJ^{-1}PAR]$	0.017	-	-	-
	$\tau [ppm]$	45	1.5	-	-
	$g'_m [mms^{-1}]$	7.0	2.0	5	28
	$A_{m,max} [mgm^{-2}s^{-1}]$	2.2	2.0	8	38
	f_0	0.85	-	-	-
C4	$\varepsilon_0 [mgJ^{-1}PAR]$	0.014	-	-	-
	$\tau [ppm]$	2.8	1.5	-	-
	$g'_m [mms^{-1}]$	17.5	2.0	13	36
	$A_{m,max} [mgm^{-2}s^{-1}]$	1.7	2.0	13	38
	f_0	0.50	-	-	-

Schritt 02

Im zweiten Schritt wird die interne/interzelluläre CO₂-Konzentration (C_i) des Blattes berechnet.

$$C_i = f \cdot C_s + (1 - f) \cdot \tau$$

wobei; C_s ist die CO₂-Konzentration an der Blattoberfläche oder in der Umgebungsluft

τ ist die im vorherigen Schritt berechnete CO₂-ausgleichskonzentration

f ist ein Faktor, der die stomatäre Reaktion auf Feuchtigkeit berücksichtigt

$$f = f_0 \left(1 - \frac{D_s}{D_{max}} \right) + f_{min} \left(\frac{D_s}{D_{max}} \right)$$

wobei; f_0 ist der Wert von f bei $D_s = 0$ g/kg (siehe Tabelle 1)

f_{min} ist der Wert von f bei $D_s = D_{max}$

D_s ist das spezifische Feuchtigkeitssättigungsdefizit der Luft an der Blattoberfläche [g/kg]

D_{max} ist der Wert von D_s , bei dem die Stomata vollständig geschlossen sind

(hier wird ein Wert von 45 g/kg nach (Choudhury & Monteith, 1986) angenommen, um Nutzpflanzen und Laubwälder darzustellen)

$$D_s = q^* - q$$

wobei; q^* ist der Sättigungspunkt der spezifischen Luftfeuchtigkeit bei einer bestimmten Umgebungstemperatur [g/kg]

q ist die spezifische Luftfeuchtigkeit bei einer bestimmten Umgebungstemperatur [g/kg]

$$f_{min} = \frac{g_c}{g_c - g_m}$$

wobei; g_m ist die im vorherigen Schritt berechnete Mesophyll-Leitfähigkeit

g_c ist die kutikuläre Leitfähigkeit

Normalerweise wird g_c auf einen konstanten Wert von 0,25 eingestellt,

obwohl er für Nutzpflanzen zwischen 0,1 und 0,4 mm s^{-1} liegt und für Bäume sogar noch kleiner ist.

Schritt 03

Im dritten Schritt werden die anfängliche Quanteneffizienz (ε) und die physikalisch aktive Strahlung (PAR), die die Blattoberfläche erreicht (I_a), berechnet.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{C_i - \tau}{C_i + 2\tau}$$

Wobei; ε_0 = C3-Pflanzen: 0,017 $\text{mgJ}^{-1}\text{PAR}$; C4-Pflanzen: 0,014 $\text{mgJ}^{-1}\text{PAR}$ (siehe Tabelle 1)

Es ist die maximale Quantennutzungseffizienz basierend auf der theoretischen Effizienz des Calvin-Zyklus, korrigiert mit einem Verlustfaktor

C_i ist die im vorherigen Schritt berechnete interne/interzelluläre CO_2 -Konzentration im Blatt

τ ist die im vorherigen Schritt berechnete CO_2 -ausgleichskonzentration

Schritt 04

Im vierten Schritt, die Netto-Photosyntheserate (A_n) kann als Funktion von CO_2 und photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) wie folgt ausgedrückt werden:

$$A_m = A_{m,max} \left(1 - \exp \left(\frac{-0.001 g_m \cdot (C_i - \tau) \cdot \phi_{co2}}{A_{m,max}} \right) \right)$$

$$R_d = \frac{A_m}{9} \quad (\text{nach (van Heemst, 1986)})$$

$$A_n = (A_m + R_d) \left(1 - \exp \left(\frac{-\varepsilon I_a}{A_m + R_d} \right) \right) - R_d$$

wobei; A_n ist die Netto-Photosyntheserate (positive zum Blatt) d.h. CO_2 -Fluss pro Blattflächeneinheit

Schritt 05

Schließlich kann der stomatären Widerstand des Blattes (r_s) mithilfe der folgenden Beziehungen berechnet werden:

$$g_s = 1.6 \frac{A_n}{C_s - C_i}$$

wobei; g_s ist die Stomataleitfähigkeit

A_n ist die im vorherigen Schritt berechnete Netto-Photosyntheserate an der Blattoberfläche

C_s ist die CO_2 -Konzentration in der Umgebungsluft

C_i ist die im vorherigen Schritt berechnete CO_2 -Konzentration im Blatt (interzellulär)

Der Faktor 1,6 ergibt sich aus der unterschiedlichen Diffusionsfähigkeit von CO_2 und H_2O in der Luft.

Die Einheit der Stomataleitfähigkeit g_s ist $[\text{mm s}^{-1}]$ und daher lautet die Umrechnung in den stomatären Widerstand r_s :

$$r_s = \frac{1}{g_s} \cdot 1000$$

1.4 3D-Atmosphärenmodell: Bestrahlung & MRT

Die genaue Simulation der Strahlungsübertragung ist ein sehr wichtiger Aspekt bei der Klimamodellierung. Insbesondere für Mikroklimamodelle wie ENVI-met ist es wichtig, nicht nur die primären, sondern auch die sekundären Strahlungsflüsse, d. h. emittierte langwellige und reflektierte kurzwellige Strahlung, sehr detailliert zu simulieren. Da es immer Einschränkungen hinsichtlich des Rechenaufwands und des Speichers gibt, wurden diese Strahlungsflüsse mithilfe vereinfachter Ansätze wie dem Averaged View Sphere (AVS)-Schema implementiert. Um diese Vereinfachungen zu überwinden und so die Modellgenauigkeit zu erhöhen, wurde in den neuesten Versionen von ENVI-met ein neues Strahlungsschema namens Indexed View Sphere (IVS) eingeführt. Dieses neue Schema berücksichtigt tatsächlich die Strahlungsbeiträge von Objekten, die von jeder Gitterzelle gesehen werden, und ermöglicht daher eine viel höhere Genauigkeit bei der Simulation der mittleren Strahlungstemperatur (Simon, et al., 2021).

Die folgenden Abbildungen zeigen den Vergleich des alten AVS-Schemas mit dem neuen IVS-Strahlungsschema in einer komplexen realistischen städtischen Umgebung. Sie verdeutlichen, dass das Indexed View Sphere-Schema die Genauigkeit und Plausibilität der Modellierung von Strahlungsflüssen wie langwelliger (Abbildung 4) und reflektierter kurzwelliger Strahlung (Abbildung 5) verbessert. Abbildung 6 zeigt die letztendliche Verbesserung bei der Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur (MRT). Weitere Einzelheiten finden Sie bei (Simon, et al., 2021).

Darüber hinaus wurde in der neuen ENVI-met-Version ein neues Strahlungsübertragungsmodul (d.h. ACRT module) für Vegetationskronen eingeführt, das nicht nur die Simulation der diffusen Strahlungsauslöschung, sondern auch sekundärer Quellen diffuser Strahlung aufgrund der Streuung direkter Strahlung innerhalb von Pflanzenkronen ermöglicht (Simon, et al., 2020). Abbildung 7 zeigt den Vergleich zwischen dem Standardmodul (links) und dem ACRT-Modul (rechts) für die Strahlungsmodellierung durch Vegetation und deren Auswirkungen auf die mittlere Strahlungstemperatur (MRT). Weitere Einzelheiten finden Sie bei (Simon, et al., 2020).

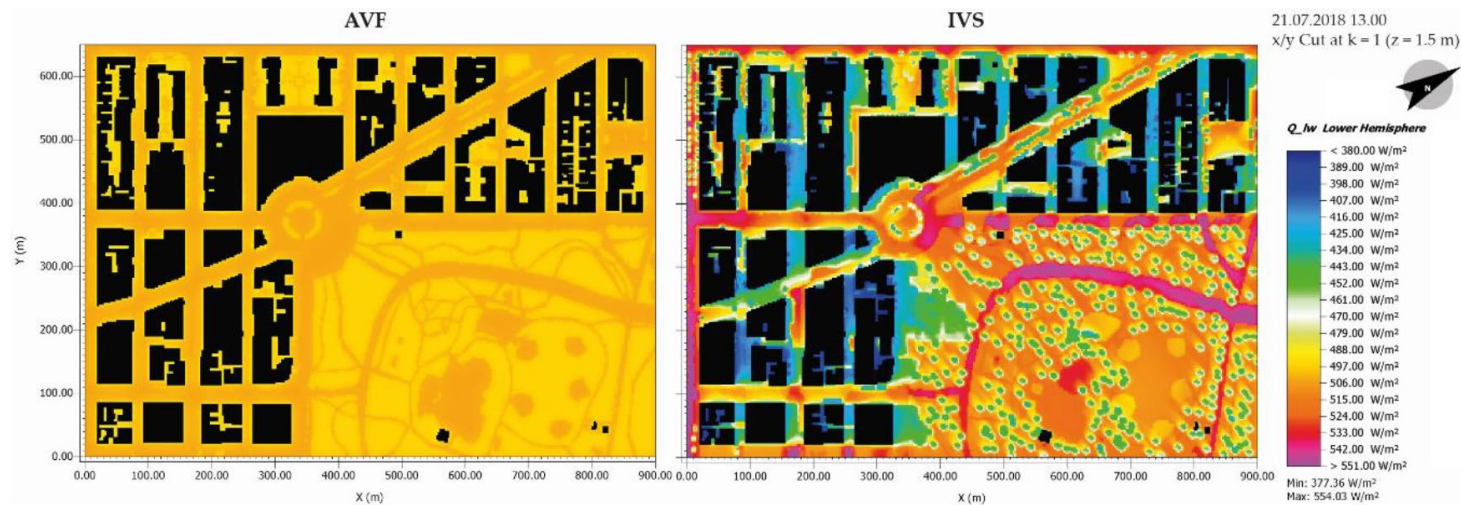


Abbildung 4: Vergleich der Proof-of-Concept-Simulationsergebnisse zwischen AVF- und IVS-Strahlungsschemata für langwellige Strahlung (nach (Simon, et al., 2021))

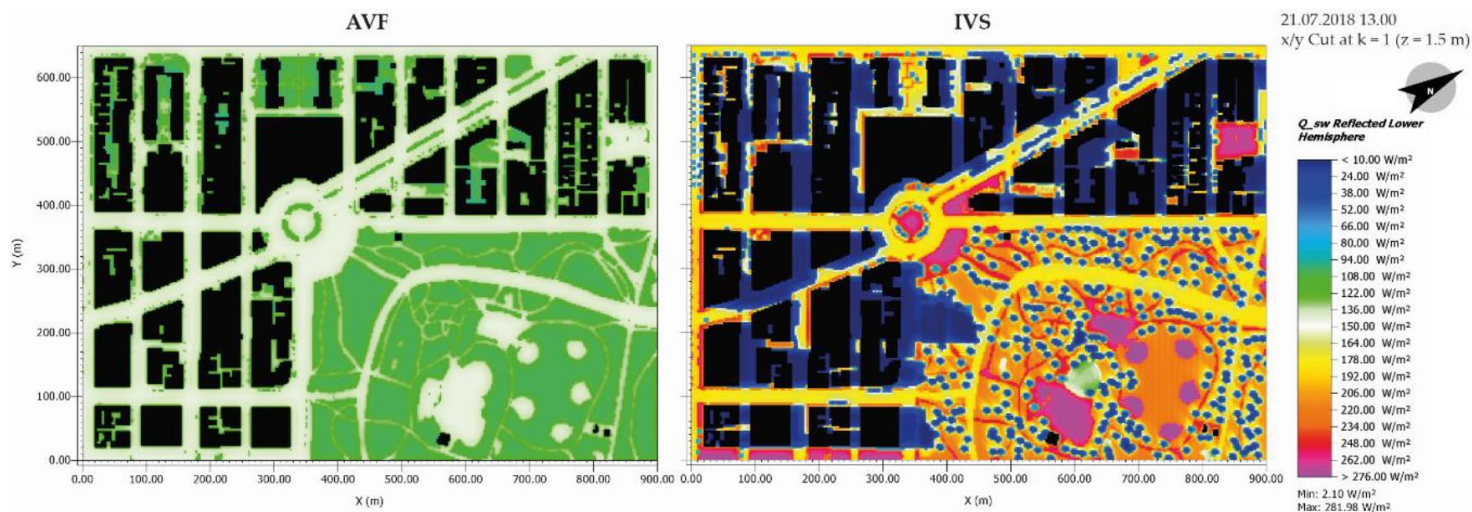


Abbildung 5: Vergleich der Proof-of-Concept-Simulationsergebnisse zwischen AVF- und IVS-Strahlungsschemata für reflektierter kurzwellige Strahlung (nach (Simon, et al., 2021))

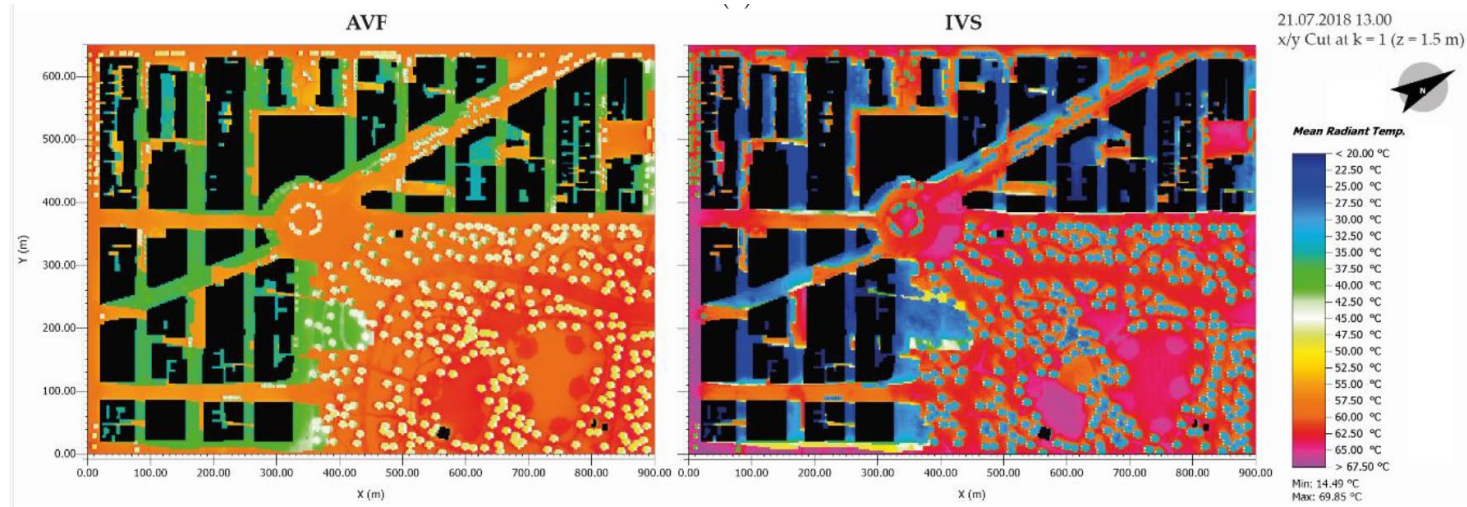


Abbildung 6: Vergleich der Proof-of-Concept-Simulationsergebnisse zwischen AVF- und IVS-Strahlungsschemata für die mittlere Strahlungstemperatur (MRT) (nach (Simon, et al., 2021))

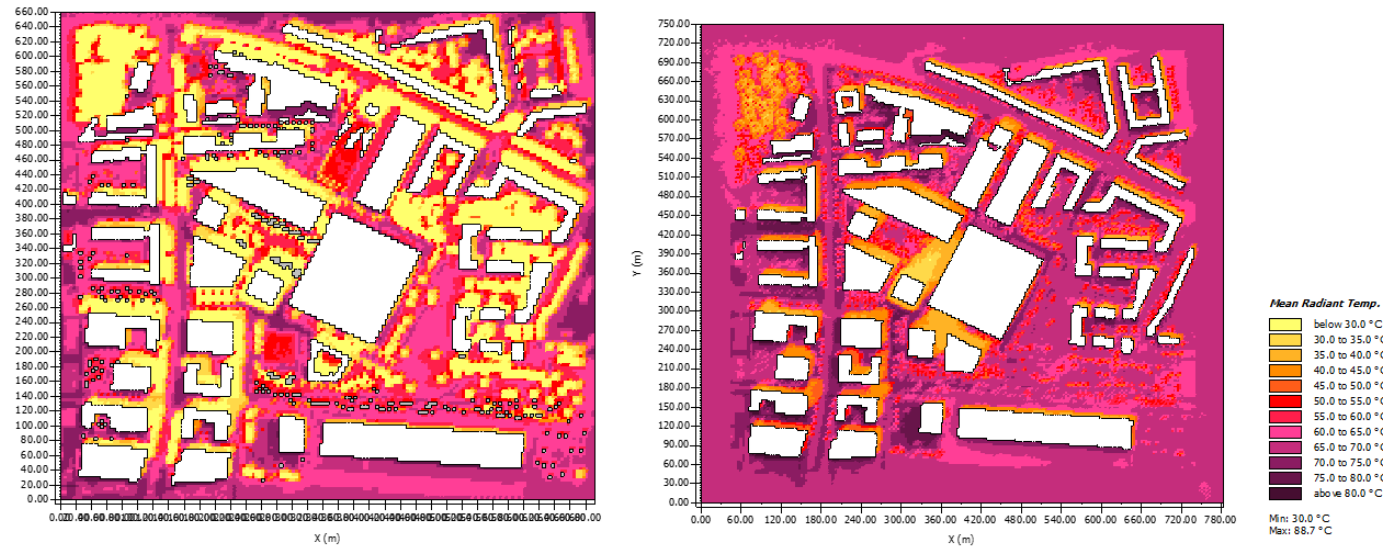


Abbildung 7: Vergleich zwischen Standard- (links) und ACRT-Modul (rechts) für die Strahlungsmodellierung durch Vegetation und deren Auswirkung auf die mittlere Strahlungstemperatur

2 Paketpostareale Mikroklima-Simulationsmodell

2.1 Region von Interesse

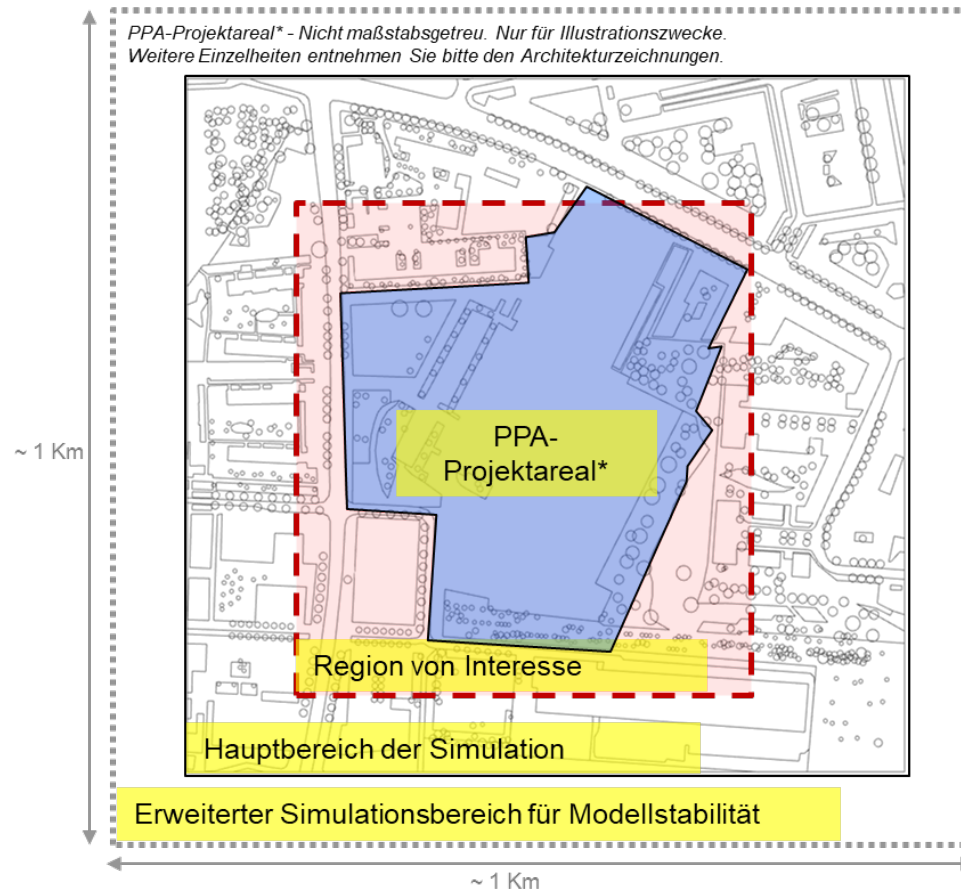


Abbildung 8: Region von Interesse Quelle: LHM

Um die Genauigkeit der Simulationen zu gewährleisten, müssen Mikroklima-/CFD-Modelle wie ENVI-met die Entwicklung der Fluidströmung angemessen auflösen. Dies erfordert in der Regel, dass die Simulationsdomäne um ein Vielfaches größer ist als die eigentliche Region von Interesse. Auch für diese Studie wird der gesamte Simulationsbereich in drei Regionen mit jeweils abnehmender Genauigkeit modelliert.

Die erste Region, die als "Region von Interesse" bezeichnet wird, umfasst den PPA-Standort und seine unmittelbare Umgebung. Diese Region wird mit dem höchsten Genauigkeitsgrad modelliert. Die Ergebnisse aus dieser Region werden für die weitere Nachbearbeitung und Auswertung gespeichert (z. B. PET-Diagramme, Karten der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit usw.).

Die Auswirkungen der Größe der Simulationsdomäne werden in Abschnitt 3.2 näher untersucht.

2.2 Übersicht über das 3D-Modell

2.2.1 Bestand

Das Folgende zeigt eine SW-Ansicht des erweiterten Simulationsbereichs für das ENVI-met 3D Model - Bestand

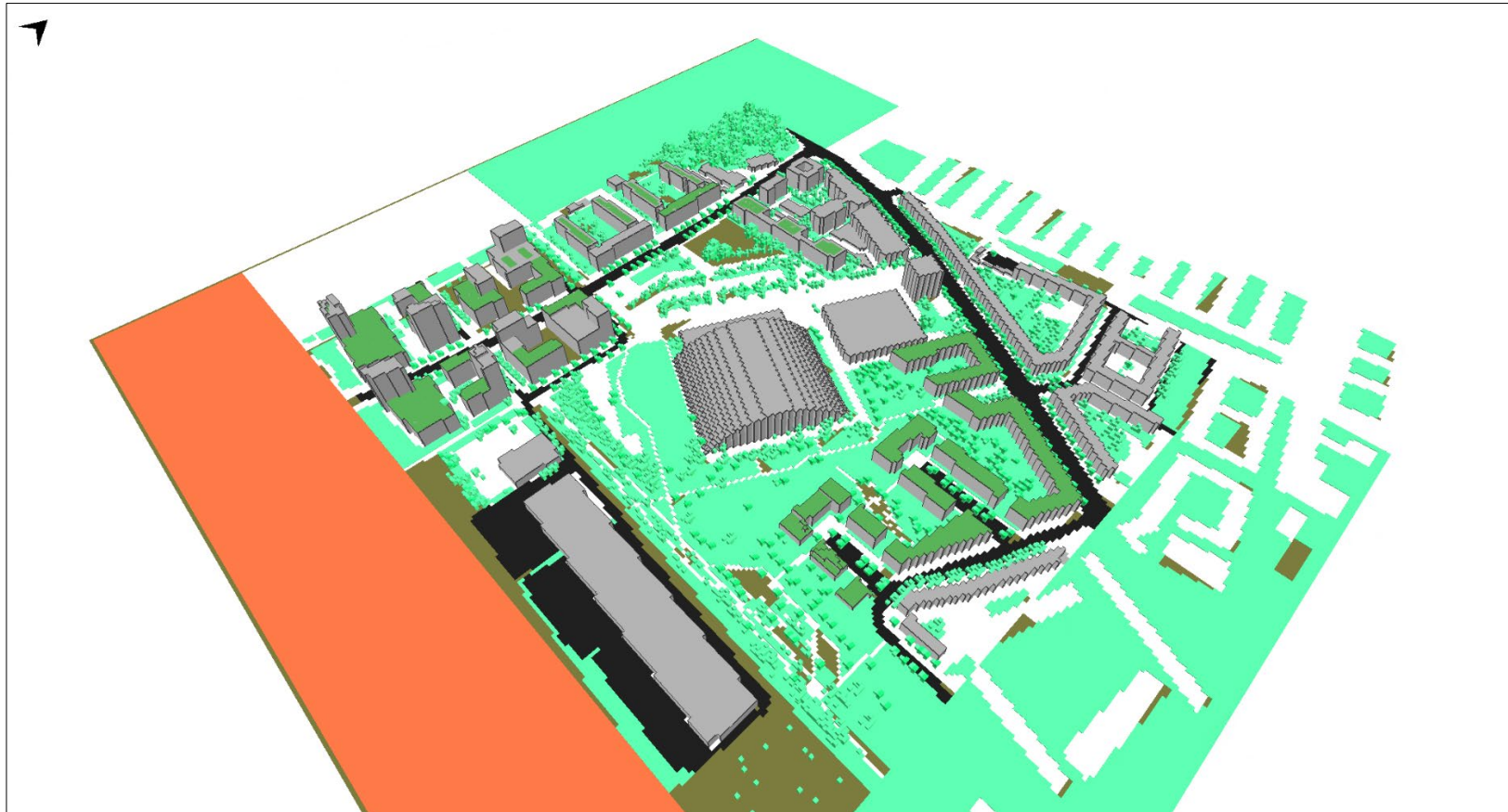


Abbildung 9: SW-Ansicht des erweiterten Simulationsbereichs für das ENVI-met 3D-Modell - Bestand

2.2.2 B-Plan 1926a

Das Folgende zeigt eine SW-Ansicht des erweiterten Simulationsbereichs für das ENVI-met 3D Model – B-Plan 1926a

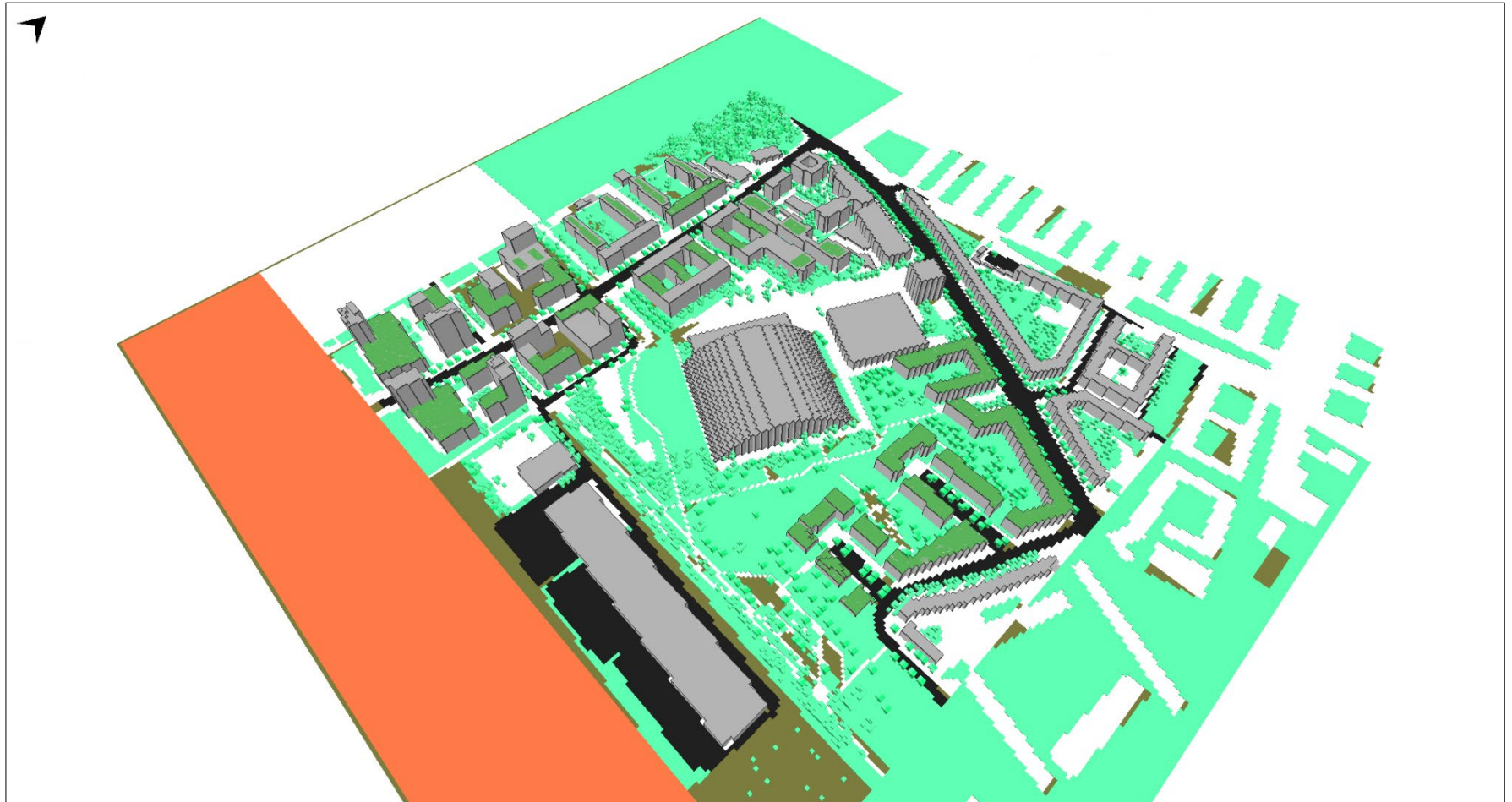


Abbildung 10: SW-Ansicht des erweiterten Simulationsbereichs für das ENVI-met 3D-Modell – B-Plan 1926a

2.2.3 B-Plan 2147

Das Folgende zeigt eine SW-Ansicht des erweiterten Simulationsbereichs für das ENVI-met 3D Model – B-Plan 2147

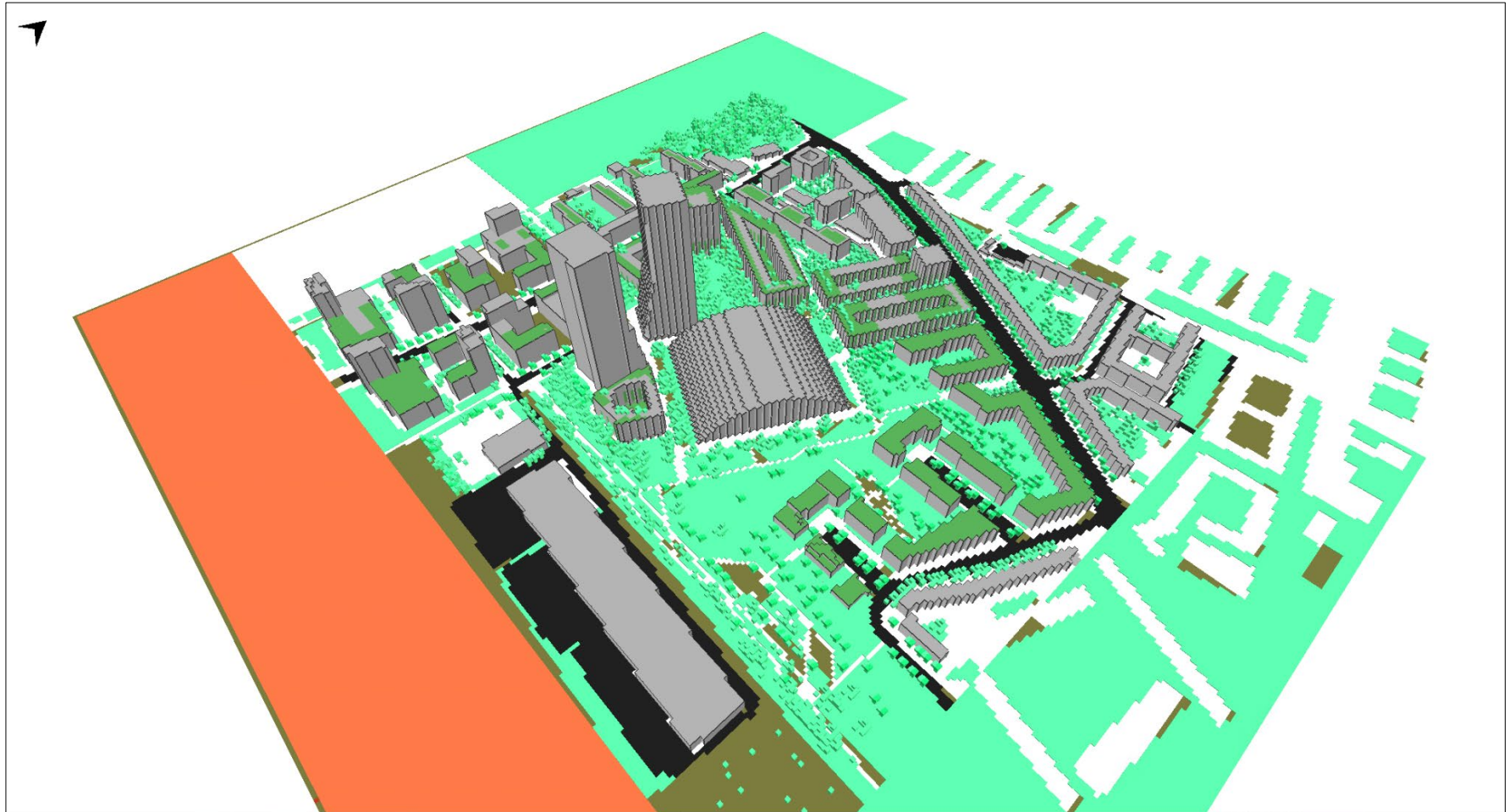


Abbildung 11: SW-Ansicht des erweiterten Simulationsbereichs für das ENVI-met 3D-Modell – B-Plan 2147

2.3 Randbedingungen: Vegetation

Im Folgenden finden Sie einen Überblick über die angenommenen Baumstandorte und -arten für die drei Szenarien (Hauptbereich der Simulation).



Abbildung 12: Baumstandorte und -arten – Bestand
Quelle: LHM



Abbildung 13: Baumstandorte und -arten - B-Plan 1926a
Quelle: LHM



Abbildung 14: Baumstandorte und -arten - B-Plan 2147
Quelle: LHM, Vogt, Herzog de Meuron

Tabelle 3 zeigt die Annahmen zur Modellierung der Bäume in den drei verschiedenen Wuchsordnungsszenarien dar.

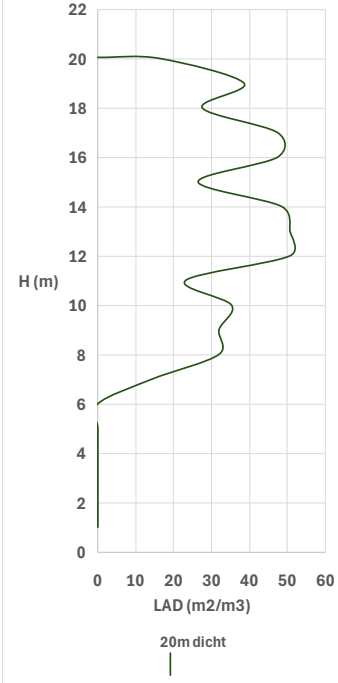
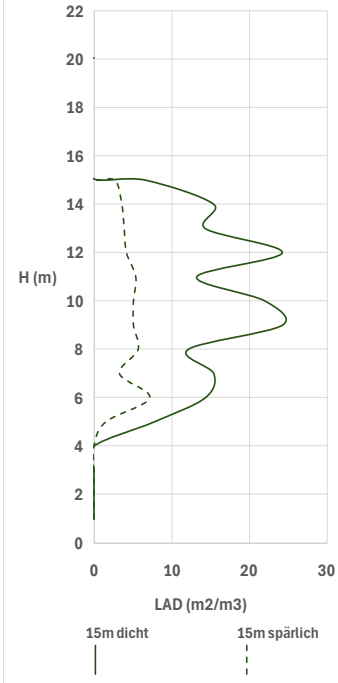
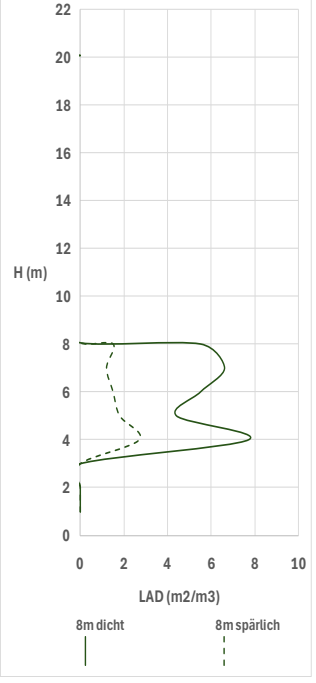
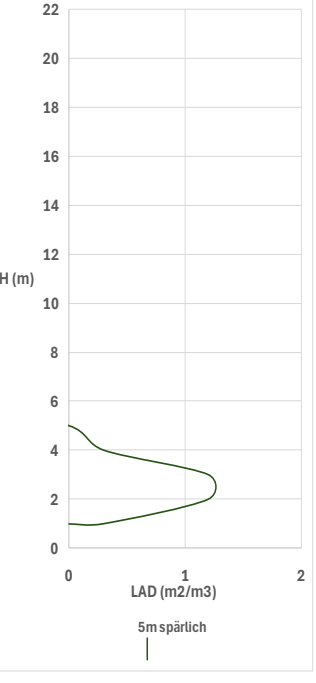
Die Bäume im Bestands-Szenario und die Bäume, die erhalten bleiben (vor allem in der Umgebung des Grundstücks) wurden mit ihrer heutigen Größe simuliert.

In Abstimmung mit der LHM, wurden die Baum-Neupflanzungen nicht entsprechend den Plänen des Landschaftsarchitekturbüros Vogt in ihrer geplanten Wuchsordnung modelliert, sondern in einer geringeren Wuchsordnung / Größe. (Bäume mit geplanter Wuchsordnung 1 wurden als Bäume der Wuchsordnung 2 simuliert.) Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Bäume erst in 20-30 Jahren zu ihrer vollen Größe gewachsen sind. Es wird also ein Zeitpunkt simuliert, der in näherer Zukunft zu erwarten ist. Mit der Zeit innerhalb der nächsten 30 Jahren wird der Komfort sich entsprechend positiver entwickeln.

Tabelle 2: Modellierte Wuchsordnung der Bäume

Farbe	Größe	Kronenform	LAD (Leaf Area Density)
	20 m	kegelförmig	dicht
	15 m	kegelförmig	dicht
	15 m	kegelförmig	spärlich
	8 m	kegelförmig	dicht
	8 m	kegelförmig	spärlich
	5 m	konisch	spärlich

Tabelle 3: Beschreibung der Vegetation mit den verschiedenen Wuchsordnungen

	20 m, dicht	15 m, dicht	15 m, spärlich	8 m, dicht	8 m, spärlich	5 m, spärlich
Baumhöhe	20 m	15 m	15 m	8 m	8 m	5 m
Baumbreite	13 m	9 m	9 m	5 m	5 m	3 m
LAD-Profil (m2/m3)						
Blatt typ	Laubblätter					
Kurzwellenalbedo in ein einzelnes Blatt	0.18					
Kurzwellendurchlässigkeit eines einzelnen Blattes	0.30					
Emissionsgrad in ein einzelnes Blatt	0.96					

2.4 Randbedingungen: Dachbegrünung

Im Folgenden finden Sie einen Überblick über die Dachbegrünungen für die drei Szenarien (Hauptbereich der Simulation).



Abbildung 15: Dachbegrünung – Bestand Quelle. LHM



Abbildung 16: Dachbegrünung - B-Plan 1926a Quelle. LHM

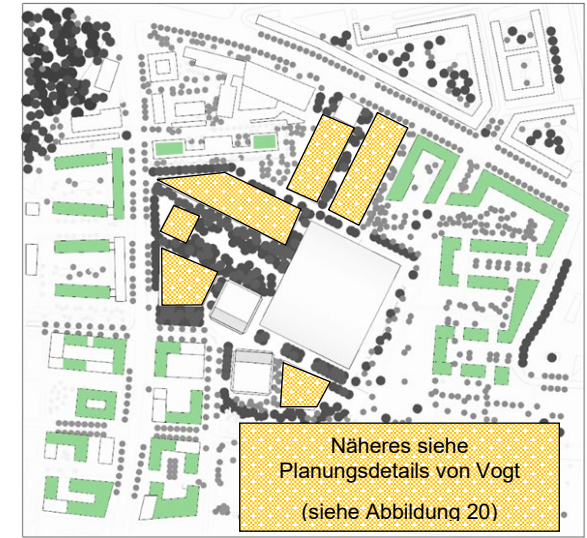


Abbildung 17: Dachbegrünung - B-Plan 2147 Quelle. LHM, Vogt, Herzog de Meuron

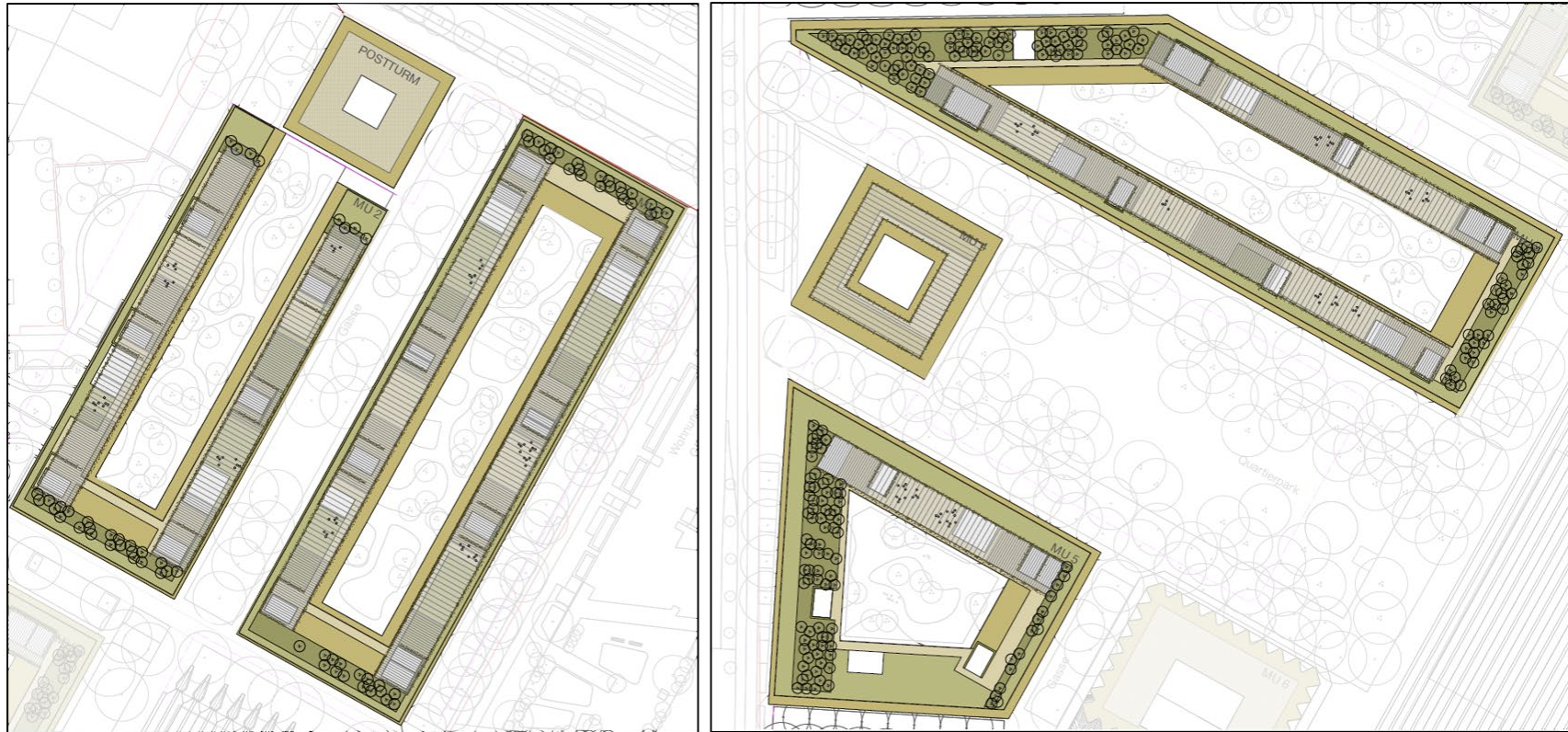


Abbildung 18: Dachbegrünung - B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 01.03.2024).

Die Dachbegrünungsdetails für B-Plan 2147 basieren auf den Planungsdetails von Vogt / bgsm. (Stand: 01.03.2024)

Die Dachbegrünung wurde entsprechend den Planungsvorgaben mit 35% intensiver und 20% extensiver Begrünung angesetzt.

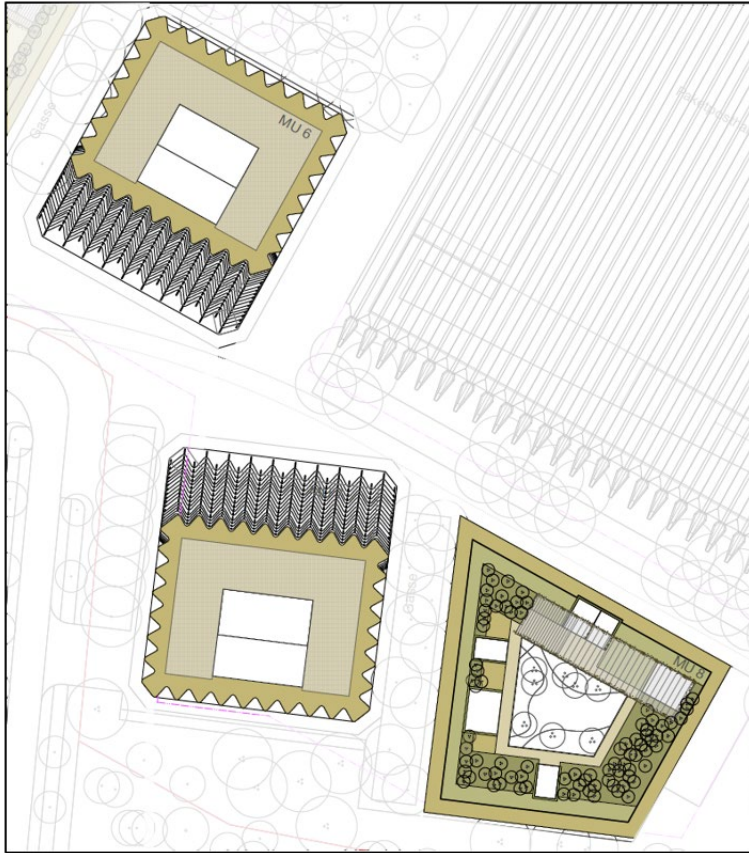


Abbildung 19: Dachbegrünung - B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 01.03.2024).

2.5 Randbedingungen: Innenhofbegrünung

Im Folgenden finden Sie einen Überblick über die Innenhofbegrünungen für die B-Plan 2147.



Abbildung 20: Innenhofbegrünung - B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 01.03.2024).

Die Innenhofbegrünungsdetails für B-Plan 2147 basieren auf den Planungsdetails von Vogt. (Stand: 01.03.2024)

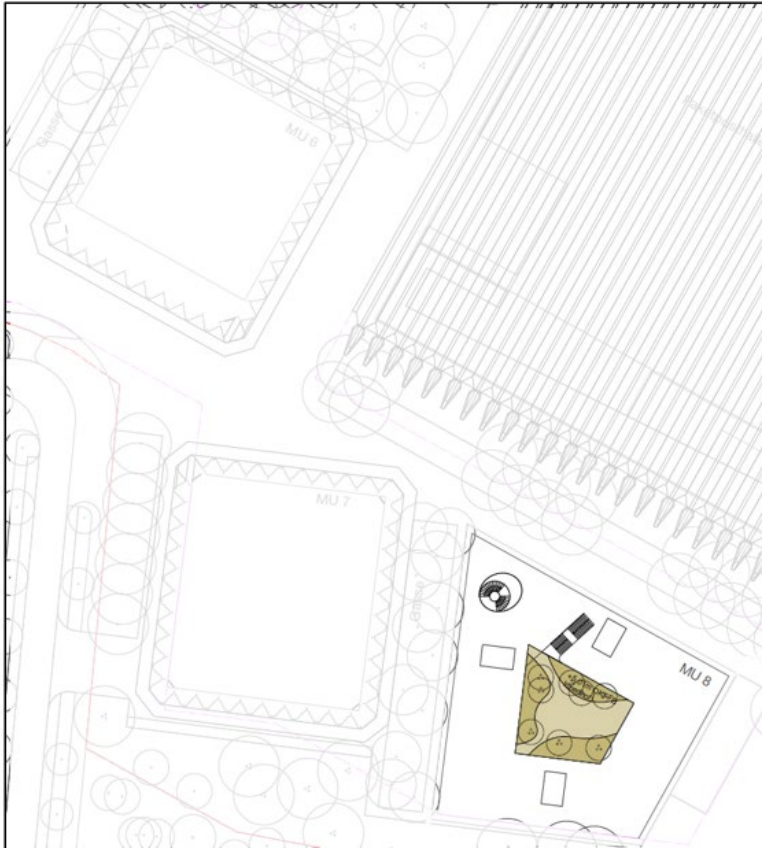


Abbildung 21: Innenhofbegrünung - B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 01.03.2024).

2.6 Randbedingungen: Grünflächen und Boden

Nachfolgend sind die angenommenen Grünflächen für die drei Szenarien dargestellt. Für die meisten Flächen wurde 8 cm hohes Gras angenommen (Hauptbereich der Simulation).

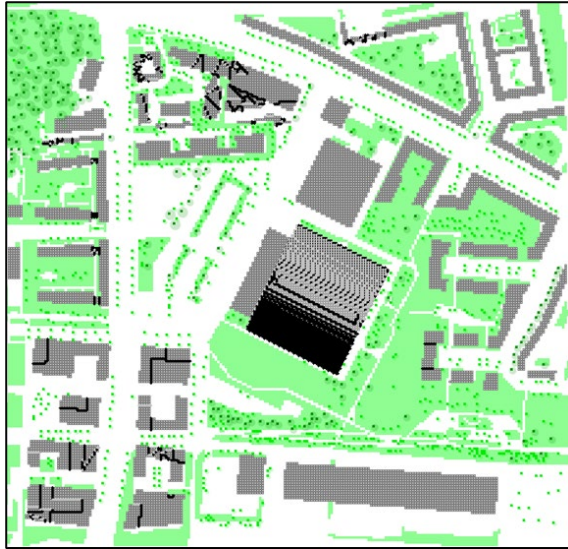


Abbildung 22: Grünflächen - Bestand

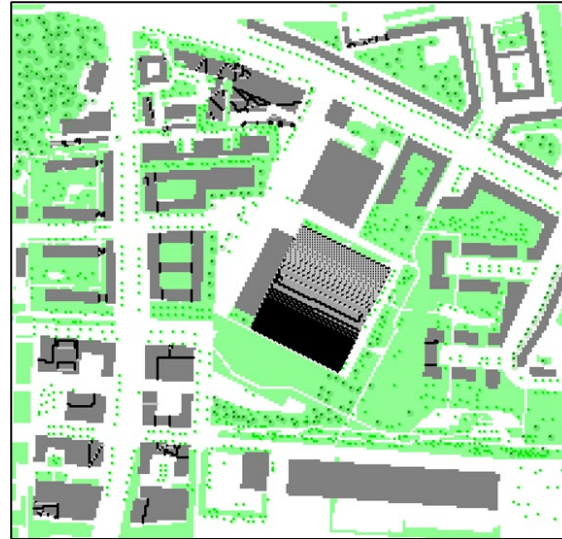


Abbildung 23: Grünflächen - B-Plan 1926a

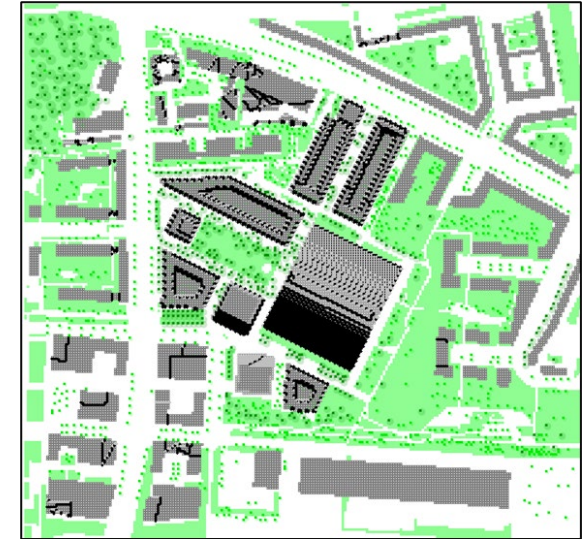


Abbildung 24: Grünflächen - B-Plan 2147

Legende

Gebäude	
Grünfläche	
Andere Flächen (hier nicht weiter spezifiziert)	

Nachfolgend sind die angenommenen Bodeneigenschaften aufgeführt.

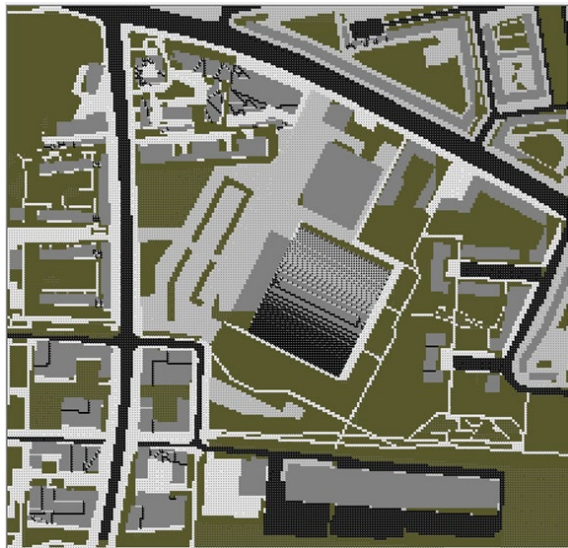


Abbildung 25: Bodeneigenschaften - Bestand

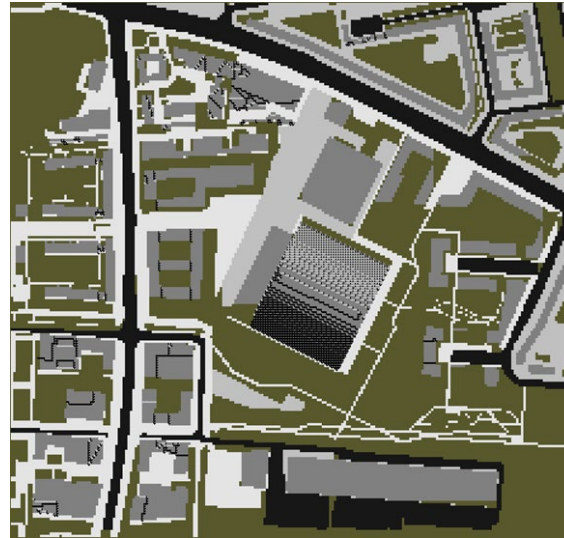


Abbildung 26: Bodeneigenschaften - B-Plan 1926a

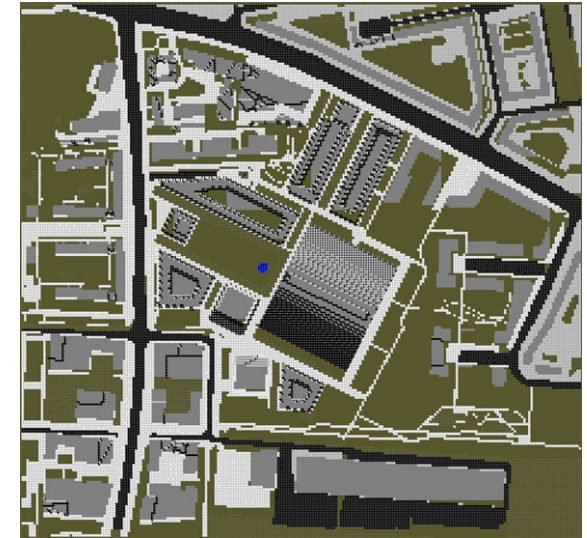


Abbildung 27: Bodeneigenschaften - B-Plan 2147

Tabelle 4: Bodeneigenschaften im 3D-Modell.

Farbe	Material	Albedo
	Asphalt Straße	0,12
	Bodenplatten (u. Gebäude)	-
	Grauer Gehwegbelag	0,3
	Hellgrauer Gehwegbelag	0,5
	Sandiger Lehm	0,2
	Wasser	-

2.7 Randbedingungen: Bodenfeuchte und Bodentemperatur

Tabelle 5: Randbedingungen: Bodenfeuchte und Bodentemperatur

Bodenschicht	Initiale Bodenfeuchte (%)	Initiale Temperatur (°C)
Obere Schicht (0 - 20 cm)	65 %	20 °C
Mittlere Schicht (20 - 50 cm)	70 %	20 °C
Tiefe Schicht (50 - 200 cm)	75 %	19 °C
Grundsicht (unter 200 cm)	75 %	18 °C

Die Randbedingungen der Bodentemperatur können einen erheblichen Einfluss auf die Oberflächentemperatur von Bodenbelägen wie Pflaster, Gras, Sand usw. haben. Für die Zwecke dieser Studie ist die angenommene Anfangstemperatur-Randbedingung in der obigen Tabelle aufgeführt.

Diese Temperaturen sind repräsentativ für typische Werte, die in der Region München für die simulierte mittlere-Sommer-Wetterperiode zu erwarten sind. Diese Werte wurden mit dem beratenden Hydrogeologen für das Projekt abgestimmt.

Die Bodenfeuchte spielt auch eine wichtige Rolle für die Verdunstung von Pflanzen, die Albedo von nackten Böden wie Gras usw. Für die Zwecke dieser Studie ist die angenommene anfängliche Feuchte-Randbedingung in der obigen Tabelle aufgeführt.

Diese Werte repräsentieren einen einigermaßen gut bewässerten und gepflegten Boden.

2.8 Randbedingungen: Fassadenbegrünung

Entsprechend der Planung des Landschaftsarchitekturbüros Vogt wurden hinsichtlich der Fassadenbegrünung für das B-Plan 2147 ein Grünfassadenanteil von 30% für den Bereich vom 1. bis 5. Obergeschoss angenommen. Dies entspricht einer Grünfassadenhöhe von 15 Meter und einer Endhöhe von 20 Metern über Grund. Es wurde ein LAI (Leaf Area Index) von $0,4 \text{ m}^2/\text{m}^2$ angenommen.

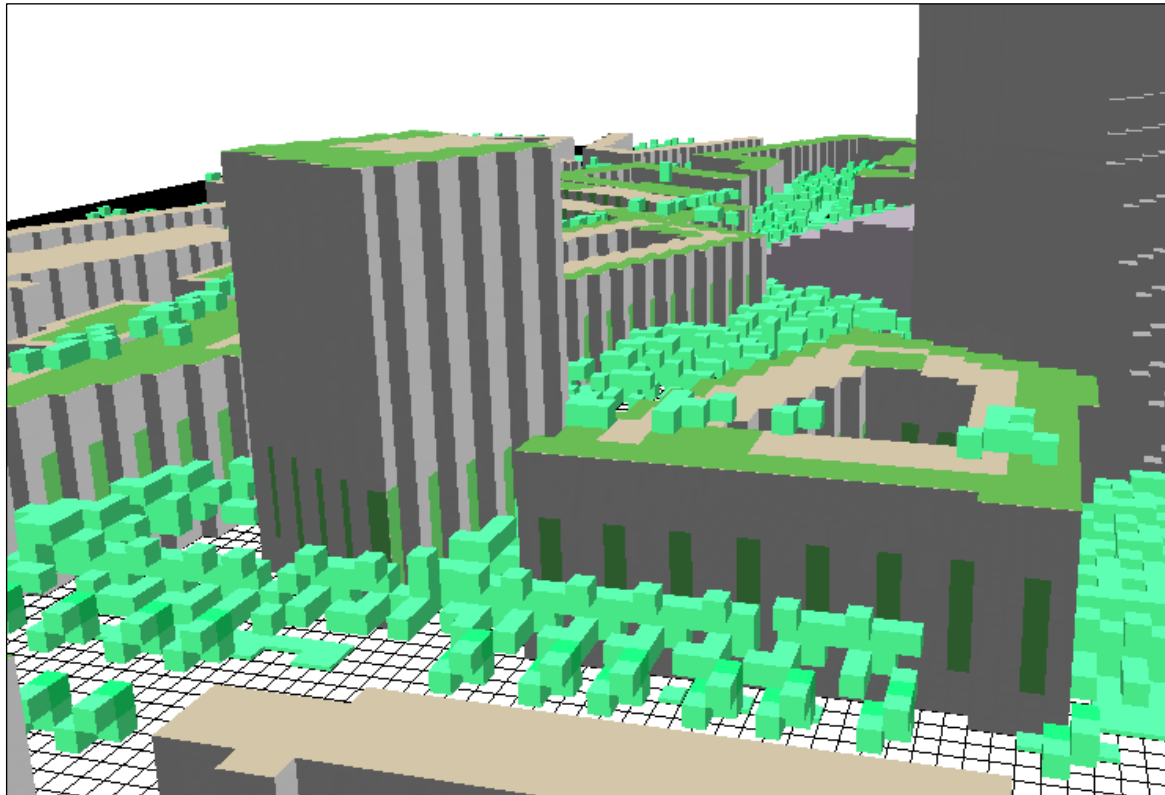
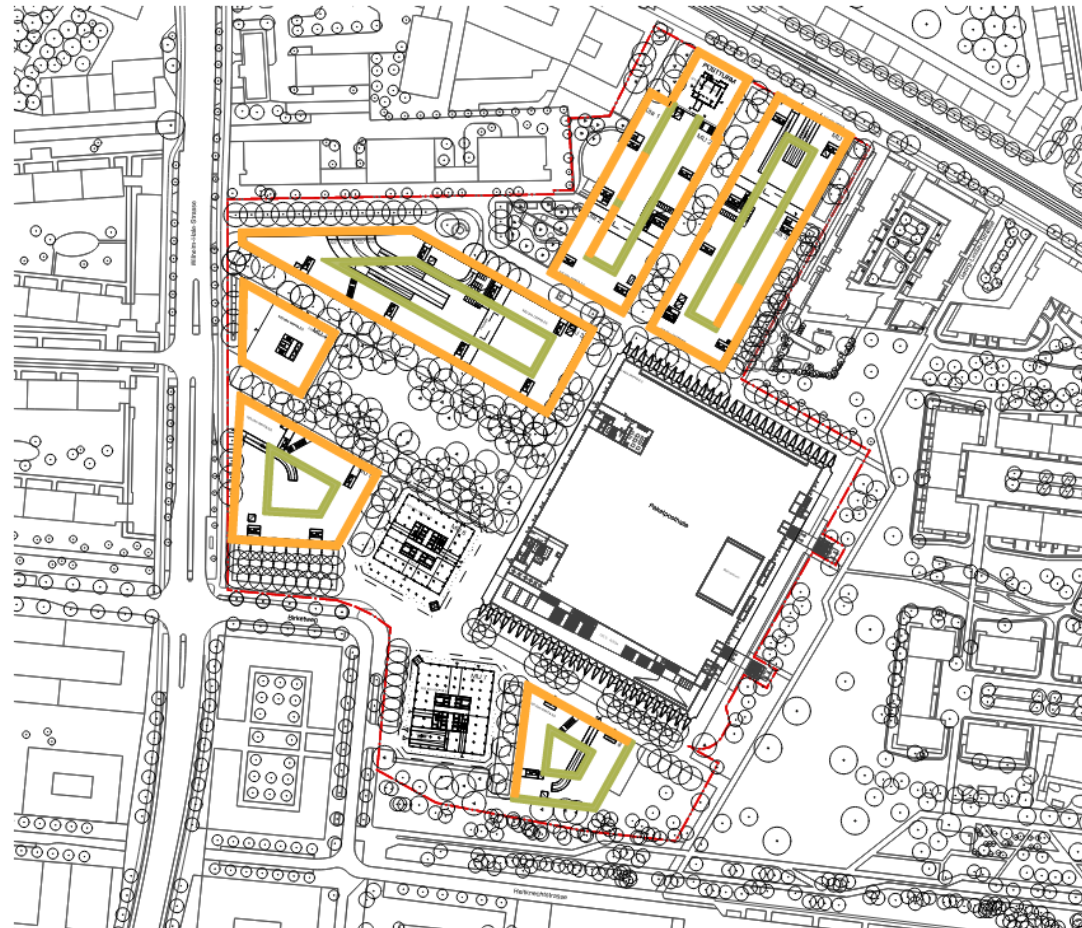


Abbildung 28: Fassadenbegrünung B-Plan 2147 (Beispiel)

Fassadenbegrünung Übersicht

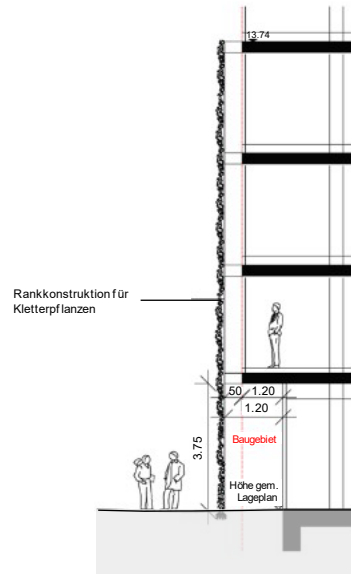


Übersichtsplan Fassadenbegrünung

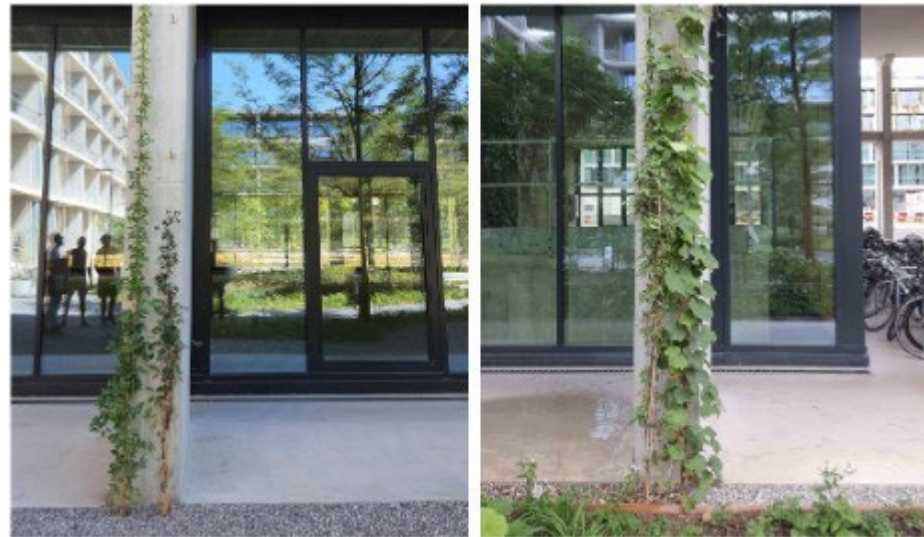
	Fassadenbegrünung bodengebunden												
	Fassadenbegrünung fassadengebunden												
<table> <tr> <td>Aussenfassade Total</td><td>1740m</td></tr> <tr> <td>Hoffassade Total</td><td>876m</td></tr> <tr> <td>Fassade Total</td><td>2616m</td></tr> <tr> <td>fassadengebunden</td><td>1539m</td></tr> <tr> <td>bodengebunden</td><td>1077m</td></tr> <tr> <td>Begrünung Total</td><td>2616m = 100%</td></tr> </table>		Aussenfassade Total	1740m	Hoffassade Total	876m	Fassade Total	2616m	fassadengebunden	1539m	bodengebunden	1077m	Begrünung Total	2616m = 100%
Aussenfassade Total	1740m												
Hoffassade Total	876m												
Fassade Total	2616m												
fassadengebunden	1539m												
bodengebunden	1077m												
Begrünung Total	2616m = 100%												
MU1													
Aussenfassade Total	352m												
fassadengebunden	352m = 100%												
Hoffassade Total													
bodengebunden	236m = 90,25%												
fassadengebunden	23m = 9,75%												
MU2													
Aussenfassade Total	264m												
fassadengebunden	264m = 100%												
Hoffassade Total													
bodengebunden	192m = 72,91%												
fassadengebunden	52m = 27,09%												
Postturm													
Aussenfassade Total	86m												
fassadengebunden	86m = 100%												
MU3													
Aussenfassade Total	418m												
fassadengebunden	418m = 100%												
Hoffassade Total													
bodengebunden	258m = 100%												
MU4													
Aussenfassade Total	166m												
fassadengebunden	166m = 100%												
MU5													
Aussenfassade Total	253m												
fassadengebunden	253m = 100%												
Hoffassade Total													
bodengebunden	114m = 100%												
MU8													
Aussenfassade Total	201m												
bodengebunden	81m = 40,3%												
fassadengebunden	120m = 59,7%												
Hoffassade Total													
bodengebunden	76m = 100%												

Abbildung 29: Fassadenbegrünung - B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails für von Vogt (Stand: 06.03.2024)

Fassadenbegrünung bodengebunden
Prinzipschnitt



Fassadenbegrünung bodengebunden
Referenz



Fassadenbegrünung bodengebunden
Anteil Begrünung 30% der gesamten Fassadenfläche

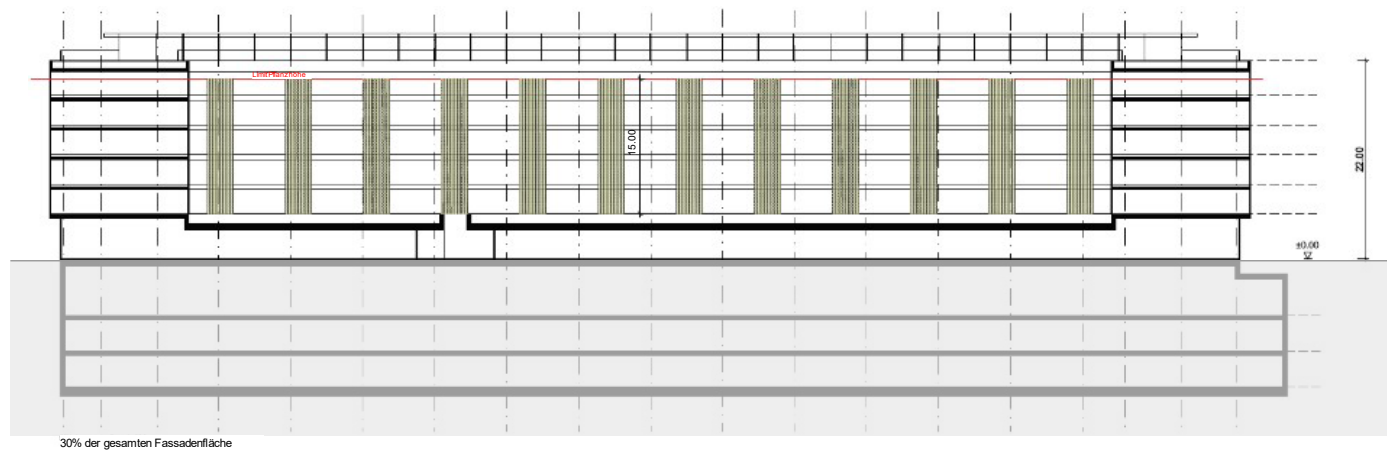
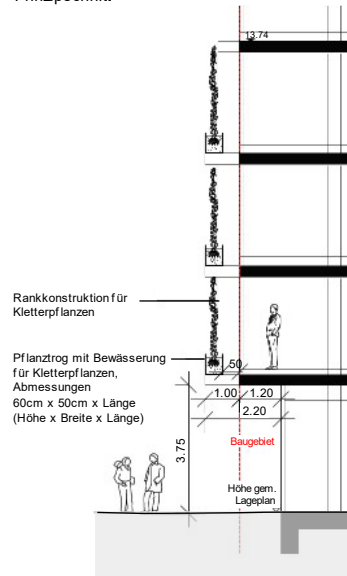


Abbildung 30: Fassadenbegrünung bodengebunden- B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 06.03.2024)

Fassadenbegrünung fassadengebunden
Prinzipschnitt



Fassadenbegrünung fassadengebunden
Referenz



Fassadenbegrünung fassadengebunden
Anteil Begrünung 30% der gesamten Fassadenfläche

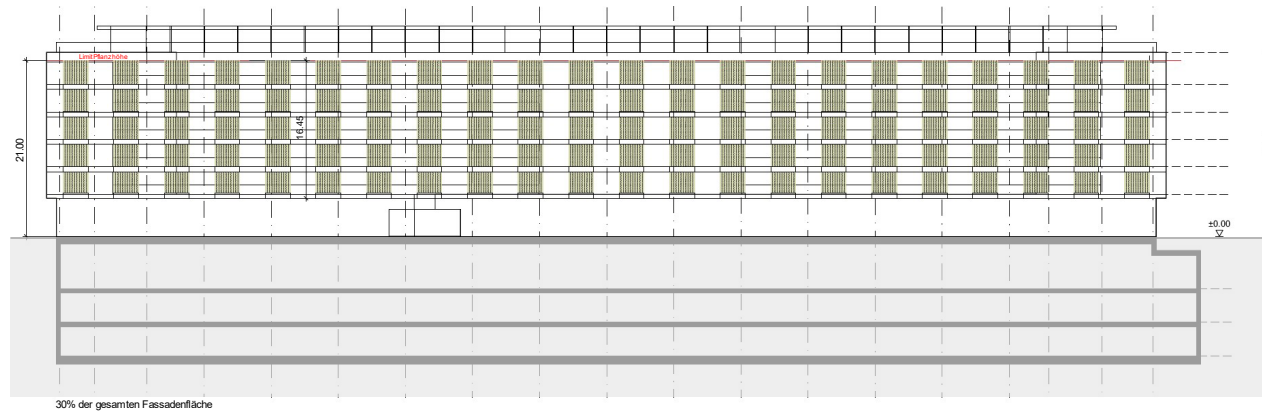


Abbildung 31: Fassadenbegrünung Fassadengebunden- B-Plan 2147 Quelle: Planungsdetails von Vogt (Stand: 06.03.2024)

2.9 Randbedingungen: Gebäudehülle

Die folgenden U-Werte der Fassade wurden mit den Gebäudeenergie-/Wärmesimulationen für das Projekt koordiniert und im ENVI-met-Modell verwendet:

Tabelle 6: Randbedingungen: Fassade U-Werte + g-Werte

Bauteil	U-/g-Wert
Außenwand gegen Außenluft (Fassade)	0.18 (W/m^2k)
Boden gegen Erdreich	0.25 (W/m^2k)
Fenster	0.9 (W/m^2k)
g-Wert Verglasung	0.45

3 Wetterdaten

3.1 Referenztag Hochsommer (20.7) aus lokalem DWD TRY Wetterdatensatz (2 Tage)

Der Ausgangspunkt ist eine austaucharme, sommerliche Hochdruckwetterlage, wie in dem Rundschreiben des RGU (Referat für Gesundheit und Umwelt) vom 17.09.2020 empfohlen.

In Absprache mit dem Auftraggeber und der Stadt München wurde ein repräsentativer Tag aus den realen historischen Wetterdaten Münchens ausgewählt, um die vom RGU empfohlene idealisierte Wettersituation zu repräsentieren.

Transsolar analysierte die statistischen Wetterdaten für München (DWD TRY2015x N48.150 E11.523) und wählte den **20. Juli als einen repräsentativen Tag für die Simulation aus**. An diesem gewählten Tag herrschen entsprechende Wetterbedingungen, die den im Stadtklimaatlas verwendeten synthetischen Referenzwetterdaten am ähnlichsten waren. Die wichtigsten Wetterdaten für den ausgewählten Tag sind in den folgenden Punkten zusammengefasst. Auf den folgenden Seiten werden dann die ausgewählten Wetterdaten näher analysiert.

- Spitze Außenlufttemperatur (*Dry Bulb*) von 33,3 °C & 34,1 °C um 14:00 Uhr bzw. 15:00 Uhr
- Tageszeit:
 - Klare, sonnige Himmelsbedingungen während des Tages, d.h. Spitzenwert der globalen Sonneneinstrahlung von 902 W/m² & niedriger Bewölkungsgrad von 0/8.
 - Windgeschwindigkeit (10 m Höhe) von 1,5 m/s bis 3,1 m/s
- Nachtzeit:
 - niedriger Bewölkungsgrad von 2/8
 - Windgeschwindigkeit (10 m Höhe) von 0,4 m/s bis 1,0 m/s

3.1.1 Lufttemperatur (°C)

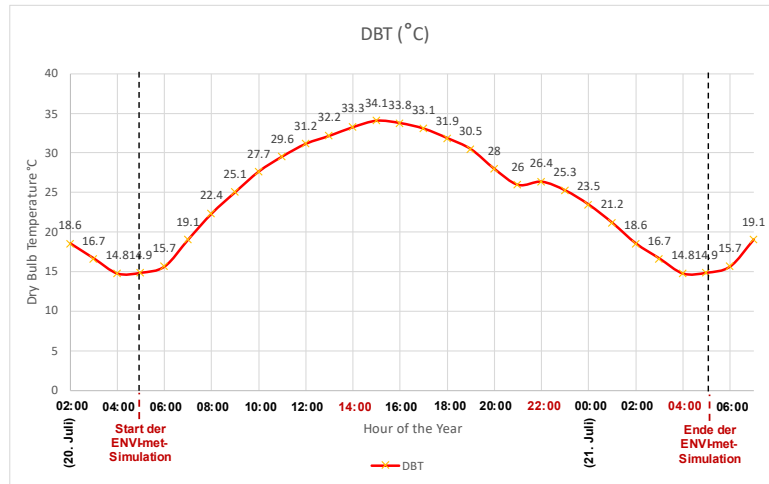


Abbildung 32: Lufttemperatur (°C) am Referenz Hochsommertag

3.1.2 Relative Luftfeuchte (%)

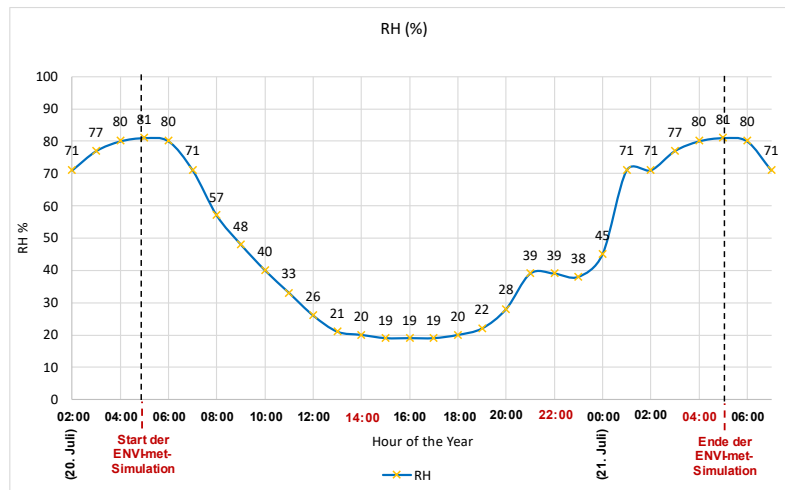


Abbildung 33: Relative Luftfeuchte (%) am Referenz Hochsommertag

Die höchste Lufttemperatur (*Dry Bulb Temperature*) während des ausgewählten Simulationszeitraums beträgt 34,1°C und tritt in der Mittagszeit gegen 15:00 Uhr auf, während die niedrigste Temperatur von 14,8°C um etwa 04:00 Uhr am frühen Morgen beobachtet wird.

Damit weist der Simulationszeitraum eine tageszeitliche Schwankung von bis zu 19,3 K auf, was typisch für eine sommerliche Hochdruckwetterlage im Raum München ist.

Die relative Luftfeuchtigkeit schwankt zwischen einem Maximum von 81 % in der Nacht und einem Minimum von 19 % am Tag.

3.1.3 Solarstrahlung (W/m²)

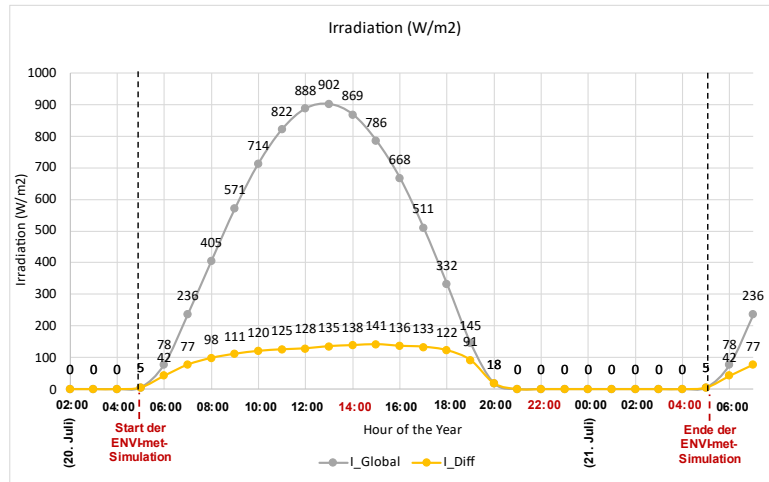


Abbildung 34: Solarstrahlung (W/m²) am Referenz Hochsommertag

3.1.4 Bewölkungsgrad (Achtel)

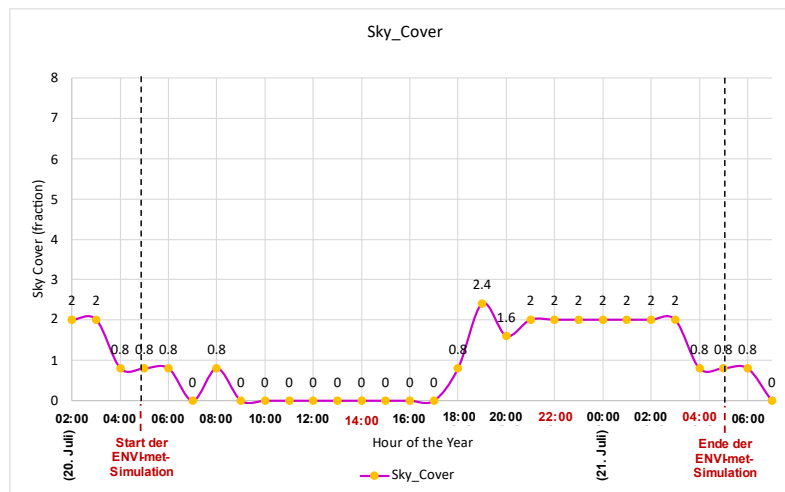


Abbildung 35: Bewölkungsgrad (Achtel) am Referenz Hochsommertag

Die maximale globale Sonneneinstrahlung während des Simulationszeitraums beträgt 902 W/m². Die diffuse Sonneneinstrahlung bleibt den ganzen Tag über relativ gering und liegt im Bereich von 100 bis 140 W/m². Diese Bedingungen geben einen typischen Hochsommertag mit klarem Himmel im Raum München gut wieder.

Die Bewölkung bleibt während des gesamten Simulationszeitraums sehr gering und erreicht ein Maximum von nur 2/8 Himmelsanteilen.

Anmerkung: Die Wolkenbedeckung wird als Bruchteil dargestellt. Ein Wert von 0/8 steht für einen völlig klaren Himmel, während eine Wolkenbedeckung von 8/8 für einen vollständig bedeckten Himmel steht.

3.1.5 Windgeschwindigkeit (m/s)

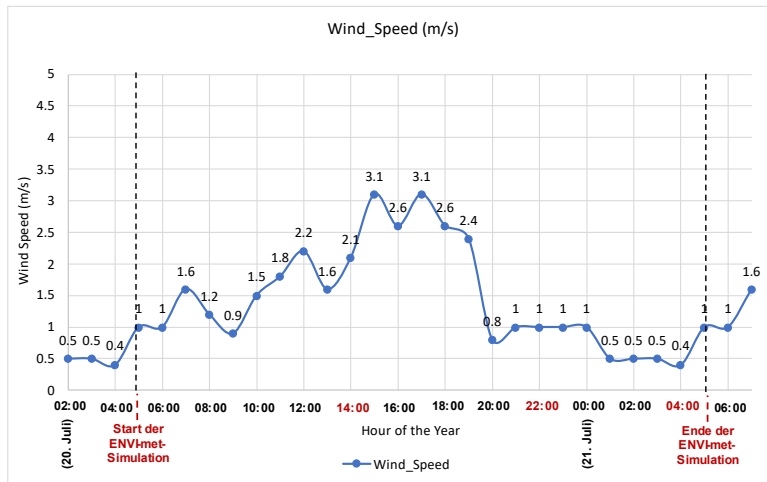


Abbildung 36: Windgeschwindigkeit (m/s) am Referenz Hochsommertag

Die Windgeschwindigkeit beträgt tagsüber zwischen 1,5 m/s und 3,1 m/s.

Während die Nacht eine austauscharme Situation darstellt und die Windgeschwindigkeit zwischen 0,4 m/s und 1,0 m/s liegt.

3.1.6 Windrichtung (°)

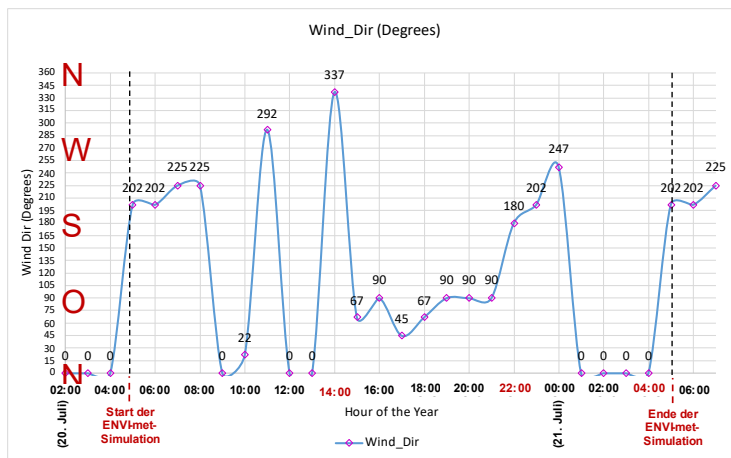


Abbildung 37: Windrichtung (°) am Referenz Hochsommertag

Auch die Windrichtung variiert im Laufe des Tages.

Um 04:00 & 14:00 Uhr kommt der Wind aus dem Norden.

Um 22:00 Uhr kommt der Wind aus dem Süden.

Anmerkung:

Windrichtung 0° = Nord

Windrichtung 90° = Ost

Windrichtung 180° = Süd

Windrichtung 270° = West

3.2 Generierung des ENVI-met 1D-Atmosphärenmodells aus der DWD TRY-Referenz Hochsommertag (20.7)

Die stündlichen meteorologischen Variablen, die von der ausgewählten DWD-Wetterstation für den Referenz-Hochsommertag bereitgestellt werden, werden in der Regel in einer Höhe von 10 m (Wind) oder 2 m (Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit usw.) gemessen/berechnet. Diese meteorologischen Variablen werden verwendet, um 1D-Vertikalprofile zu erzeugen, die sich bis zu einer Höhe von ca. 2500 m erstrecken - der typischen Höhe der planetarischen Grenzschicht, die stabile laminare Bedingungen als Input für das eindimensionale atmosphärische Grenzschichtmodell ENVI-met gewährleistet (Forouzandeh, 2018). Weitere Einzelheiten finden Sie in Abschnitt 1.1.1.

Die folgenden Abschnitte enthalten die 1D-Eingabepprofile für vier Parameter:

1. Potentielle Temperatur bei 1 atm ($^{\circ}\text{C}$)
2. Spezifische Luftfeuchtigkeit (g/kg)
3. Windgeschwindigkeit (m/s)
4. Turbulenz TKE (m^2/s^2)

3.2.1 1D-Potentialtemperaturprofil (°C)

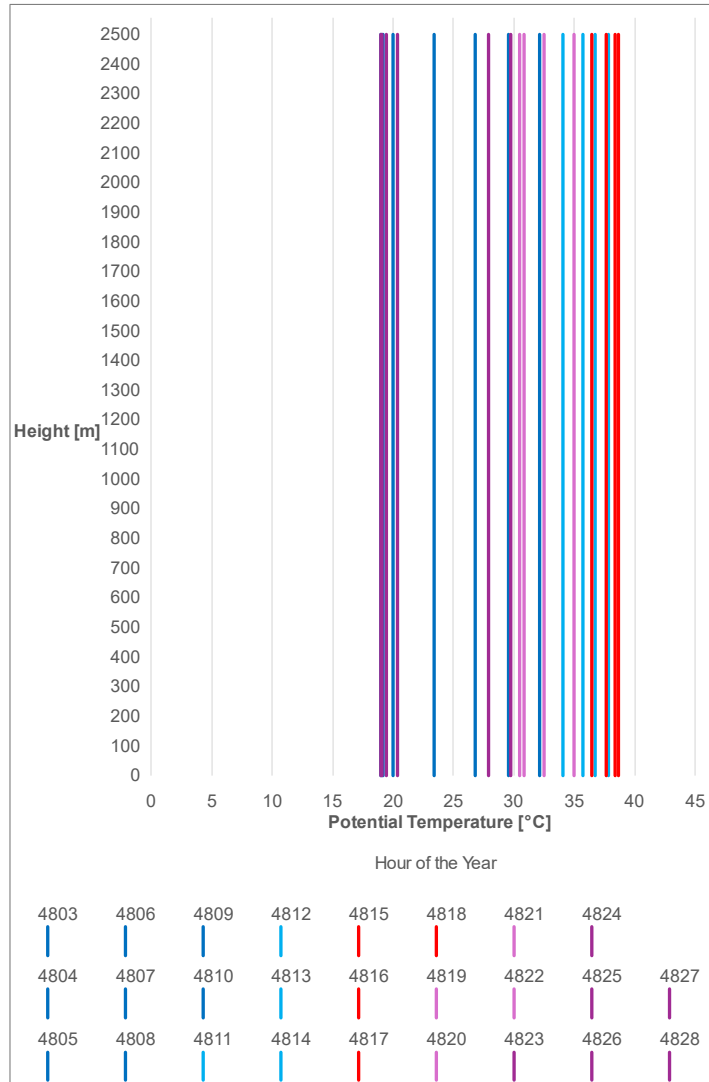


Abbildung 38: 1D-Potentialtemperaturprofil (°C) am Referenz Hochsommertag

3.2.2 1D-Feuchtigkeitsprofil (g/Kg)

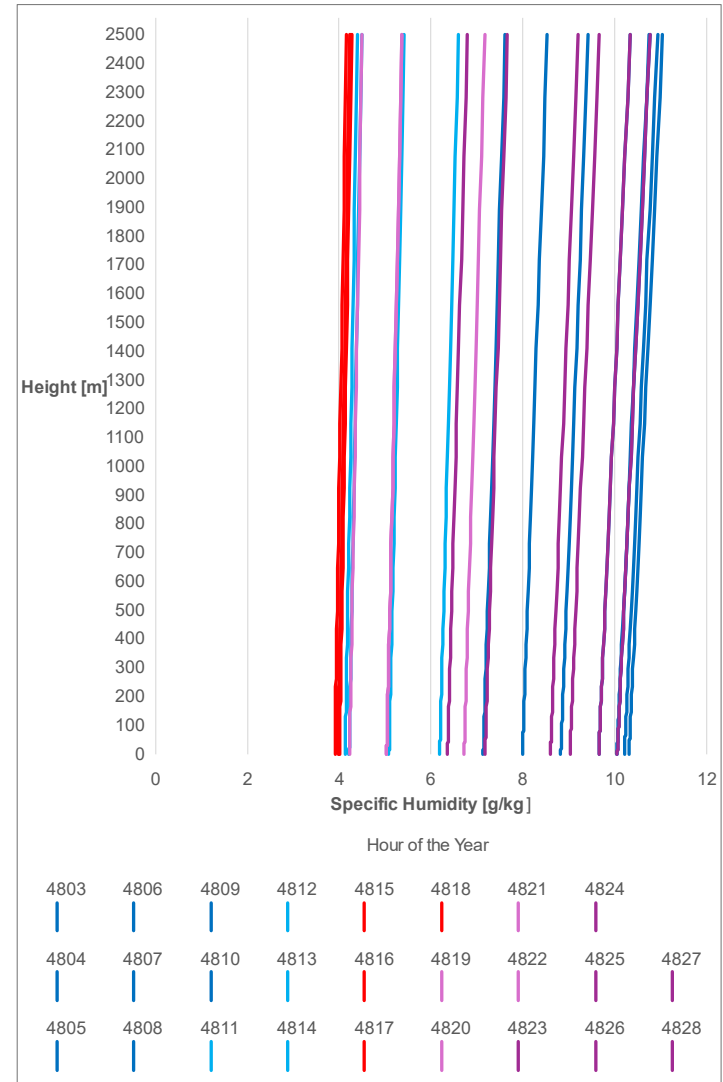


Abbildung 39: 1D-Feuchtigkeitsprofil (g/Kg) am Referenz Hochsommertag

3.2.3 1D-Windgeschwindigkeitprofil (m/s)

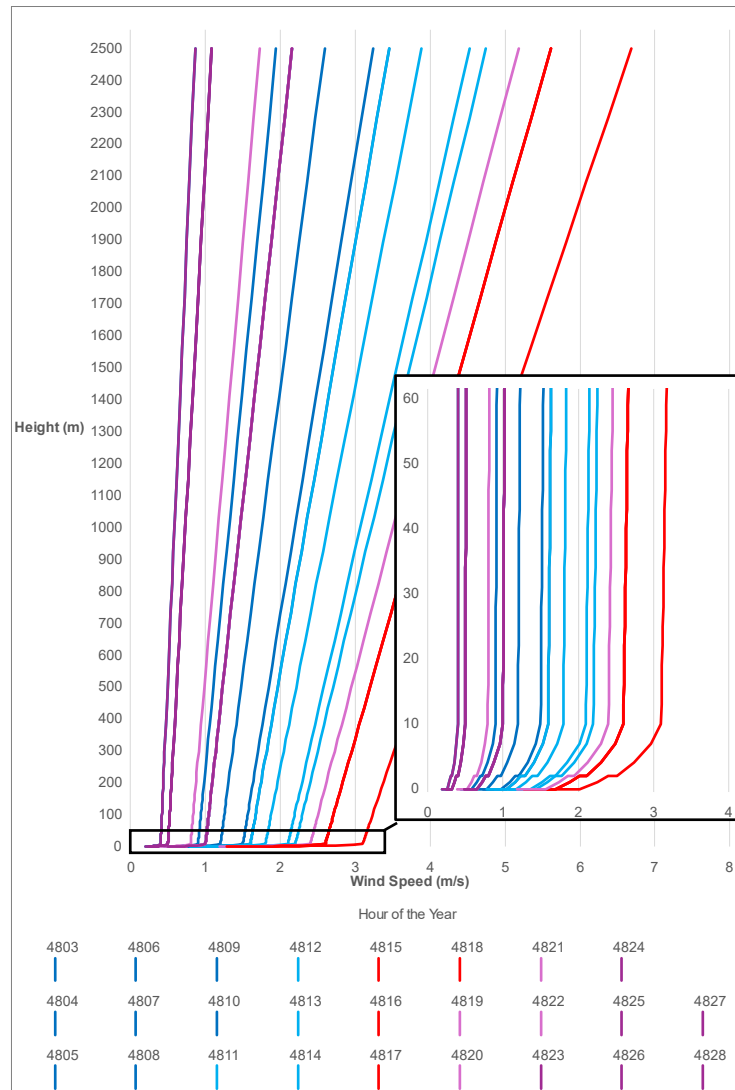


Abbildung 40: 1D-Windgeschwindigkeitprofil (m/s) am Referenz Hochsommertag

3.2.4 1D-Turbulenzprofil TKE (m^2/s^2)

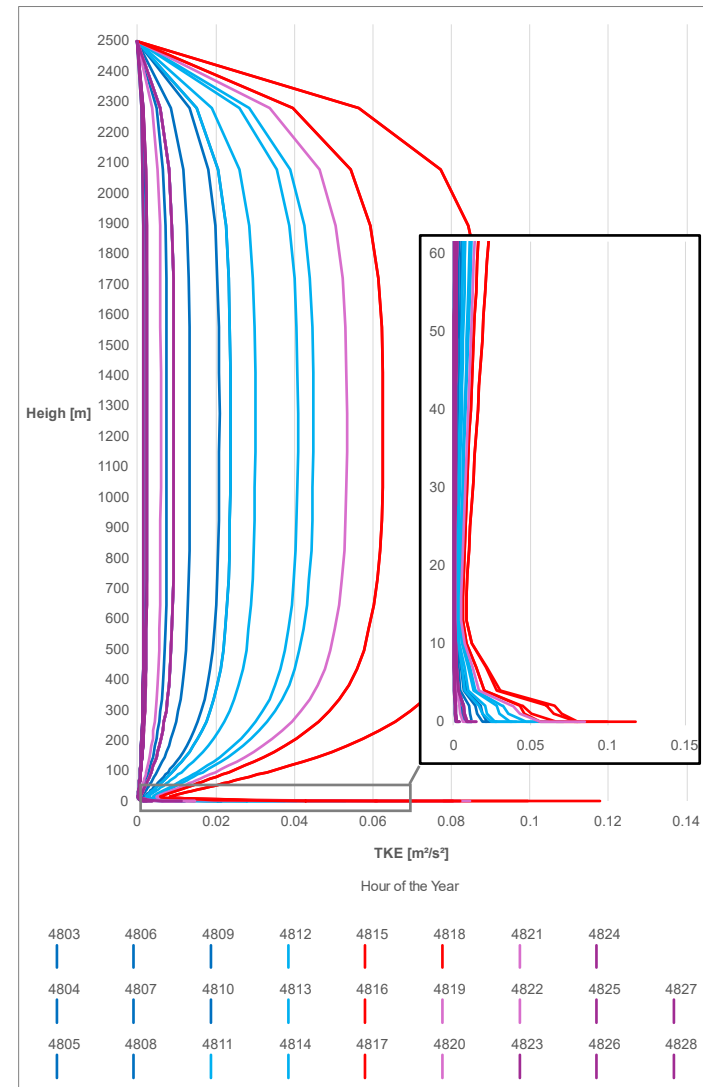
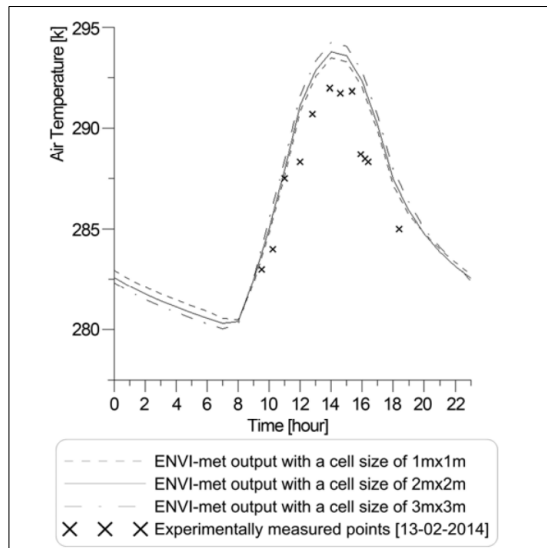


Abbildung 41: 1D-Turbulenzprofil TKE (m^2/s^2) am Referenz Hochsommertag

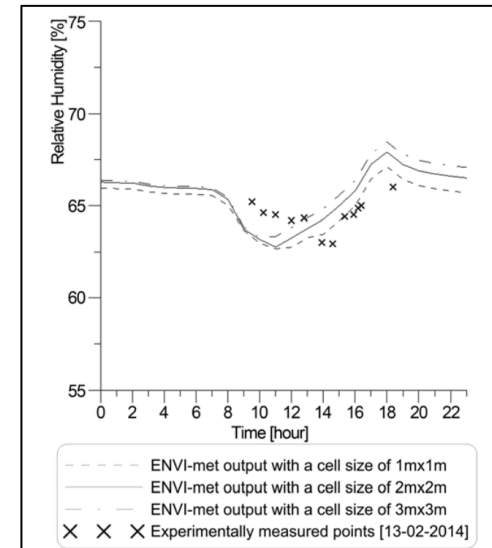
4 Auswirkungen der Größe des Simulationsmodells und der Rasterauflösung

4.1 Auswirkungen der Rasterauflösung

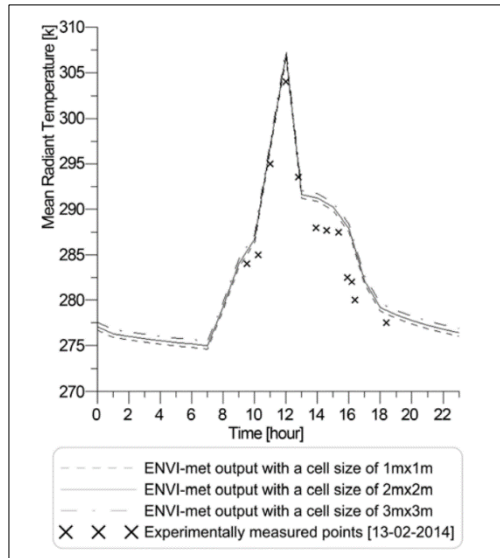
Bei einem dreidimensionalen Mikroklimamodell wie ENVI-met kann die Auflösung des Modellrasters einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse haben. Wenn das Modellraster zu groß ist, kann man sich nicht auf die Ergebnisse der Simulation verlassen. Ist das Raster hingegen unnötig klein, werden teure Rechenressourcen verschwendet und die Simulationslaufzeit verlängert sich erheblich. Um dieses Problem zu lösen, verglichen (Salata, et al., 2016) die Ergebnisse einer ENVI-met-Simulation mit drei verschiedenen Rastergrößen (1m, 2m und 3m) mit gemessenen Daten. Sie bewerteten 4 kritische Metriken: Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, mittlere Strahlungstemperatur und globale Sonneneinstrahlung (siehe Abbildung 42 – (a)(b)(c)(d)).



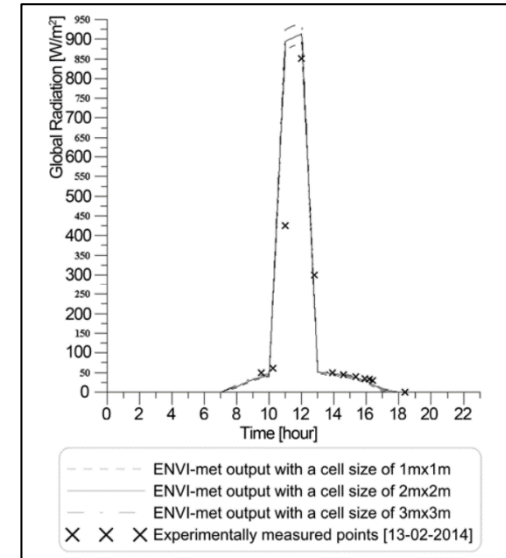
(a) Auswirkung der Rasterauflösung: Trend für die Lufttemperatur



(b) Auswirkung der Rasterauflösung: Trend für die relative Luftfeuchtigkeit



(c) Auswirkung der Rasterauflösung: Trend für die mittlere Strahlungstemperatur



(d) Auswirkung der Rasterauflösung: Trend für globale Sonneneinstrahlung

Abbildung 42: Auswirkung der Rasterauflösung (nach (Salata, et al., 2016))

Ihre Ergebnisse zeigten, dass die Genauigkeit der Ergebnisse bei einer Rasterauflösung von weniger als 3 m nicht signifikant zunimmt. Daher wurde für die Zwecke dieser Studie eine optimale Rasterauflösung von 3 m gewählt, die ein gutes Gleichgewicht zwischen Simulationsgenauigkeit und Laufzeit bietet.

4.2 Auswirkungen der Größe des Simulationsmodells

Nach der Wahl der geeigneten Rasterauflösung spielt auch die Größe des Simulationsbereichs eine sehr wichtige Rolle für die Erzielung genauer Ergebnisse. Wenn der Modellbereich nicht groß genug ist, kann es bei der Simulation zu einer un-physikalischen Abtrennung/Kompression des Luftstroms kommen. Ein kleiner Bereich kann auch nicht in der Lage sein, meso-skalige Phänomene wie die städtische Wärmeinsel zu berücksichtigen. Ist die Simulationsdomäne hingegen zu groß, kann dies zu einer Verschwendung von Rechenressourcen und Laufzeiten führen. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Sensitivitätsstudie durchgeführt, um die Auswirkungen der Größe des Simulationsbereichs auf die Genauigkeit der Ergebnisse zu bewerten.

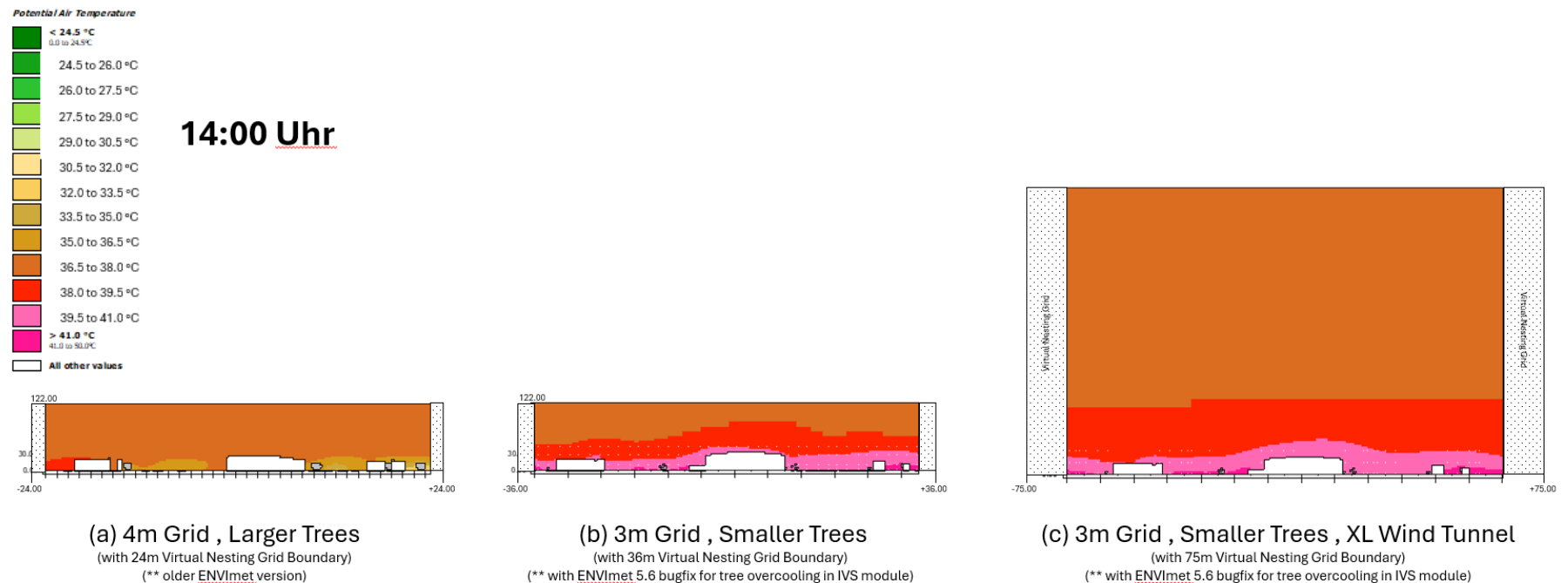


Abbildung 43: Auswirkung der Modellgröße: Sensitivitätsstudie zur Bewertung die potenzielle Lufttemperatur in verschiedenen Höhen im Simulationsbereich

Abbildung 43 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsstudie zur Bewertung der potenziellen Lufttemperatur in verschiedenen Höhen im Simulationsbereich. Es wurden drei Varianten untersucht: (a) Domänenhöhe 122m & 4m Simulationsraster, (b) Domänenhöhe 122m & 3m Simulationsraster, und (c) Domänenhöhe 500m & 3m Simulationsraster. Variante (a) wurde mit der älteren Version von ENVI-met simuliert - derjenigen, die bei der vorherigen Mikroklimabewertung vom November 2003 verwendet wurde. Die Varianten (b) und (c) wurden mit der neuesten Version 5.6 der Software simuliert, die mehrere Fehlerkorrekturen enthält und die Modellierung der Oberflächenkonvektion verbessert hat.

Wir stellen fest, dass der kombinierte Effekt einer 3m- Rastergröße und der Verwendung der neuesten Version 5.6 den Urban Heat Island-Effekt nun im Modell darstellen kann, wie in Variante (b) zu sehen ist. Aufgrund der geringen Domänenhöhe von 122 m wird die Luftströmung jedoch nicht physikalisch korrekt modelliert, wobei eine künstliche Quetschung der Luftströmung über den Gebäuden als Artefakt entsteht.

Die letzte Variante (c) mit einem großen Simulationsbereich, einer Rastergröße von 3 m und der Verwendung der neuesten Fehlerbehebungen von ENVI-met 5.6 stellt nicht nur die städtische Wärmeinsel über dem Standort besser dar, sondern folgt auch einer physikalisch realen Schichtung der Lufttemperatur über dem Modellbereich.

Auf der Grundlage der obigen Erkenntnisse wurden daher alle abschließenden Simulationen in dieser aktualisierten Ausgabe des Berichts mit einem 3m- Raster und einem großen / hohen Simulationsbereich durchgeführt, der sowohl das Meso- als auch das Mikroklima genau darstellen kann.

5 Menschlicher Wärmekomfort

Die menschliche Wahrnehmung der thermischen Komponente des Wetters und die geeignete Kleidung für thermischen Komfort resultieren aus den integralen Auswirkungen aller meteorologischen Parameter, die für den Wärmeaustausch zwischen dem Körper und seiner Umgebung relevant sind. Regulatorische physiologische Prozesse und die persönliche Wahrnehmung thermischen Komforts werden direkt von meteorologischen Parametern wie der Windgeschwindigkeit beeinflusst. Um all diese Faktoren zu berücksichtigen, ist es notwendig, ein Wärmebilanzmodell des menschlichen Körpers zu verwenden. Die in diesem Kapitel beschriebene physiologische Äquivalenttemperatur (PET) ist eine Metrik, die in diesem Bericht verwendet wird, um den Komfort im Freien genauer zu beschreiben und mit anderen Faktoren wie der operativen Temperatur und der mittleren Strahlungstemperatur zu vergleichen.

5.1 Strahlung und MRT

Die mittlere Strahlungstemperatur (MRT) ist ein Maß für die Durchschnittstemperatur aller Oberflächen, die eine Person umgeben, einschließlich Wände, Böden und Gegenstände. Im Gegensatz zur Lufttemperatur berücksichtigt die MRT den Strahlungswärmeaustausch zwischen dem menschlichen Körper und seiner Umgebung. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da Menschen nicht nur Wärme mit der Luft austauschen, sondern auch durch Strahlung von und zu nahe gelegenen Oberflächen Wärme gewinnen oder verlieren.

5.2 Operativ Temperatur

Die operative Temperatur ist ein Gesamtmaß für den thermischen Komfort, das Lufttemperatur und mittlere Strahlungstemperatur kombiniert. Sie ist der Durchschnitt der Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur, jeweils gewichtet mit dem konvektiven Wärmeübertragungskoeffizienten und dem linearisierten Strahlungswärmeübertragungskoeffizienten für den Insassen [ASHRAE 55]. Mit anderen Worten ist die operative Temperatur definiert als die gleichmäßige Temperatur eines Raums, in dem eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung plus Konvektion austauschen würde wie in der tatsächlichen ungleichmäßigen Umgebung [ISO EN 7730].

5.3 Menschlicher bioklimatischer Index - PET-Komfortskala

Die PET (Physiologische Äquivalenttemperatur) [°C] wurde als Messgröße gewählt, um die Auswirkungen der 3 Gestaltungsszenarien auf den Außenkomfort / Humanbioklimatischen Index zu bewerten.

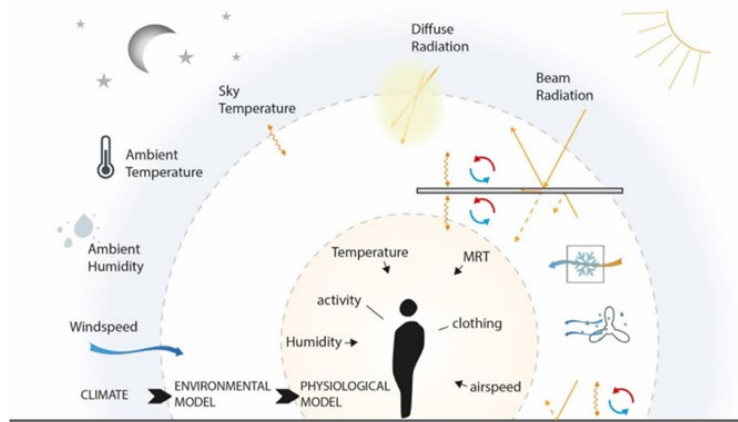


Abbildung 44: Verschiedene Parameter, die den menschlichen Wärmekomfort beeinflussen und in der PET-Skala berücksichtigt werden

PET ist ein "gefühlter" Temperaturwert und wird definiert als die operative Temperatur einer Referenzumgebung, die beim Menschen die gleiche physiologische Reaktion hervorrufen würde wie die untersuchte Umgebung. Das heißt, die gleiche Hauttemperatur und Körperkerntemperatur.

PET verwendet das Münchener Energiebilanzmodell (MEMI), das wohl das detaillierteste 3-Knoten-Modell der menschlichen Energiebilanz ist, das heute allgemein verwendet wird. Es kann verschiedene physiologische Merkmale des Menschen berücksichtigen, darunter Alter, Geschlecht, Größe und Körpermasse, und ist damit eines der einzigen Modelle, das sich für die Vorhersage des Wärmeerlebens einer bestimmten Person eignet.

Für diese Studie wurden die folgenden physiologischen Parameter verwendet, die einen "Standardmenschen" gemäß ISO 7730 definieren:

Männlich; 35 Jahre;

Gewicht: 75 kg; Größe: 1,75 m;

Gehgeschwindigkeit: 1,2 m/s; Stoffwechselrate: 163 Watt;

typische Sommerkleidung (0,5 clo)

Die PET-Komfortbewertungsskala kann in die folgenden Kategorien eingeteilt werden. Zur besseren Visualisierung der Temperaturen wurde die Obergrenze "sehr heiß" noch einmal differenziert in zwei Temperaturfarben betrachtet.

PET [°C]	Thermische Wahrnehmung	Grad der physiologischen Belastungen
<= 13	Kühl	Mäßige Kältebelastung
13.1 – 18.0	Leicht kühl	Leichter Kältebelastung
18.1 – 23.0	Komfortabel	keine thermische Belastung
23.1 – 29.0	Leicht warm	leichte Wärmebelastung
29.1 – 35.0	Warm	mäßiger Hitzebelastung
35.1 – 41.0	Heiß	Starker Hitzebelastung
>= 41.1	Sehr heiß	Extremer Hitzebelastung

PET

	<i>unter 13°C</i>	<i>kühl</i>
	<i>13.1 bis 18.0°C</i>	<i>leicht kühl</i>
	<i>18.1 bis 23.0°C</i>	<i>komfortabel</i>
	<i>23.1 bis 29.0°C</i>	<i>leicht warm</i>
	<i>29.1 bis 35.0°C</i>	<i>warm</i>
	<i>35.1 bis 41.0°C</i>	<i>heiß</i>
	<i>41.1 bis 47.0°C</i>	<i>sehr heiß</i>
	<i>über 47.0°C</i>	<i>sehr heiß</i>

Abbildung 45: PET-Komfortbewertungsskala Kategorien

6 Kühlende Wirkung von Vegetation

Im Folgenden werden Ergebnisse zum Einfluss der Vegetation auf den Komfort im Außenbereich diskutiert. Dabei wird zuerst gezeigt, welche Kenngrößen durch die Vegetation beeinflusst werden (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Strahlungstemperatur). Anschließend wird auf den Effekt von Fassadenbegrünung eingegangen.

6.1 Grundlagen

Die vom Menschen empfundene Temperatur hängt neben der Lufttemperatur von einer Vielzahl von Faktoren ab, wobei im Freiraum besonders die Temperatur der Umgebungsflächen, die Luftfeuchte und die Luftgeschwindigkeit hervorzuheben sind, siehe Abschnitt 5. Die Temperatur der Umgebungsflächen bestimmt die mittlere Strahlungstemperatur MRT.

Den Analysen zu Grunde liegen die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Planungen zur Vegetation. Die Abbildung 12 bis Abbildung 14 zusammen mit Tabelle 2 wird nachfolgend wiederholt gezeigt, um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern.

6.2 Auswirkung der Begrünung + Baumstellungen

Randbedingungen Vegetation



Abbildung 46: Baumstandorte und -arten – Bestand Quelle: LHM



Abbildung 47: Baumstandorte und -arten - B-Plan 1926a Quelle: LHM



Abbildung 48: Baumstandorte und -arten - B-Plan 2147 Quelle: LHM, Vogt, Herzog de Meuron

Tabelle 7: Modellerte Wuchsordnung der Bäume

Farbe	Größe	Kronenform	LAD (Leaf Area Density)
●	20 m	kegelförmig	dicht
●	15 m	kegelförmig	dicht
●	15 m	kegelförmig	spärlich
●	8 m	kegelförmig	dicht
●	8 m	kegelförmig	spärlich
●	5 m	konisch	spärlich

Potenzielle Temperatur – 20. Juli - 14:00 Uhr

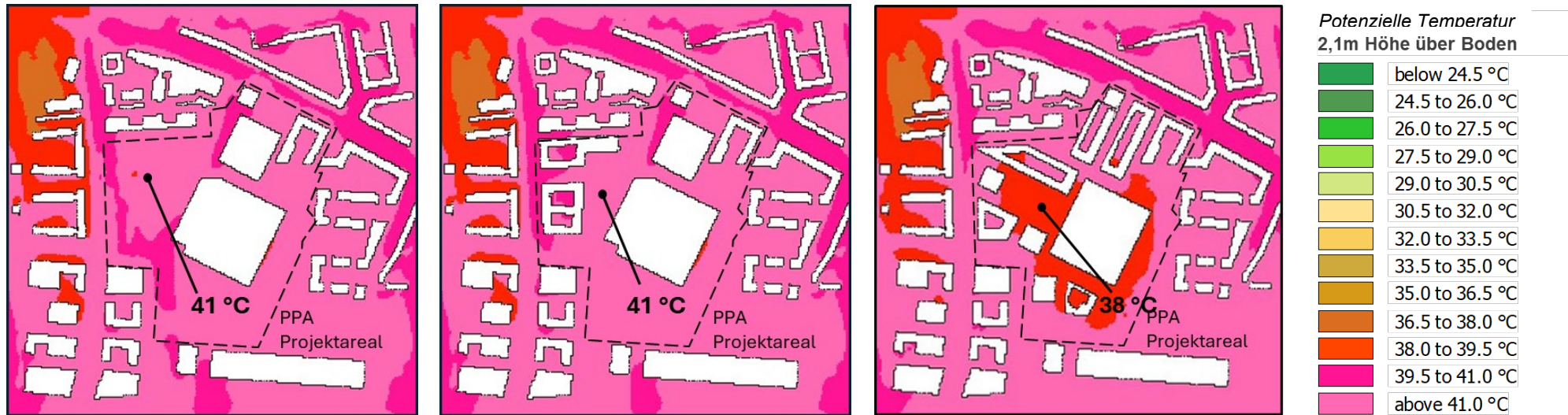


Abbildung 49: P. Potenzielle Temperatur 14:00 - Bestand

Abbildung 50: P. Potenzielle Temperatur 14:00 - B-Plan 1926a

Abbildung 51: P. Potenzielle Temperatur 14:00 - B-Plan 2147

In allen Szenarien ist in der Nord-West Ecke der Grafik deutlich der positive Einfluss des Hirschgartens auf die direkt benachbarte Bebauung zu sehen. Auf dem Platz nordwestlich der Paketposthalle beträgt die Potenzielle Temperatur im Bestand und im B-Plan 1926a 41°C. Mit dem B-Plan 2147 ist die Potenzielle Temperatur etwas niedriger mit 38°C. In diesem Bereich hat die erhöhte Verschattung durch Gebäude und Bäume, sowie die dortigen veränderten Bodeneigenschaften eine positive Auswirkung – Der Platz, der zuvor großflächig versiegelt war, ist im B-Plan 2147 als Grünfläche mit Wasserelement angesetzt - siehe Abbildung 25 bis Abbildung 27. Ebenso wirkt sich in der letzten Variante die Verdunstungskühlung durch die Evapotranspiration der Bepflanzung vorteilhaft aus.

Relative Luftfeuchtigkeit – 20. Juli - 14:00 Uhr



Abbildung 52: relative Luftfeuchtigkeit 14:00 - Bestand

Abbildung 53: rel. Luftfeuchtigkeit 14:00 - B-Plan 1926a

Abbildung 54: rel. Luftfeuchtigkeit 14:00 - B-Plan 2147

Die relative Luftfeuchtigkeit auf dem Quartiersplatz vor der Paketposthalle beträgt in allen 3 Varianten 10%. Es sind nur geringfügige Unterschiede im nördlichen und westlichen Teil des analysierten Bereichs erkennbar. Die Unterschiede in der relativen Luftfeuchte, hängen zusammen mit der Lufttemperatur.

Mittlere Strahlungstemperatur (MRT) – 20. Juli - 14:00 Uhr

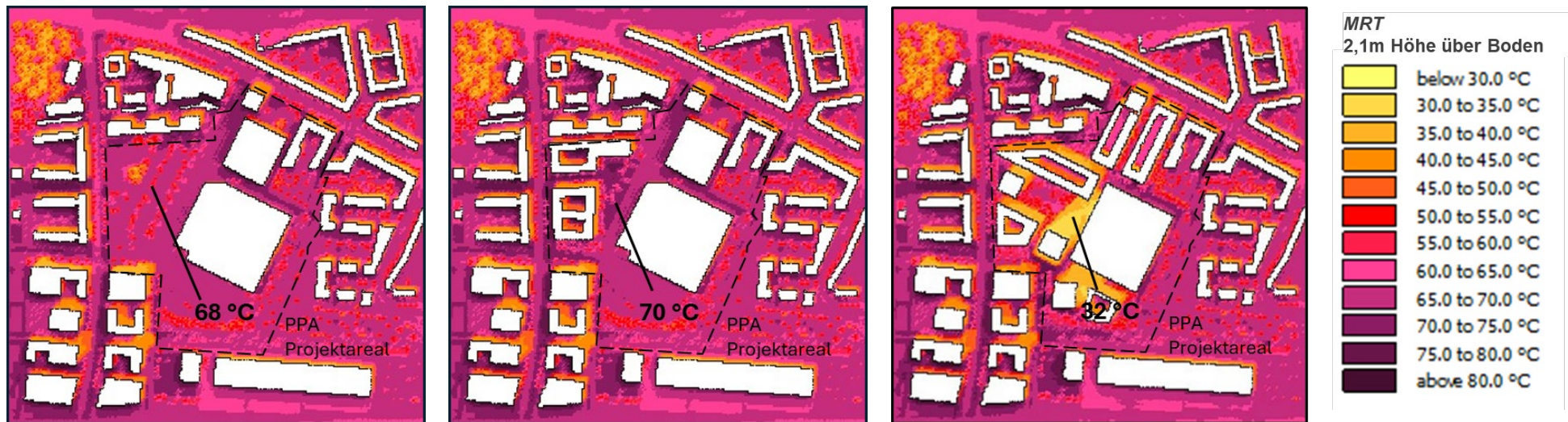


Abbildung 55: MRT 14:00 - Bestand

Abbildung 56: MRT 14:00 - B-Plan 1926a

Abbildung 57: MRT 14:00 - B-Plan 2147

Bei der Betrachtung der mittleren Strahlungstemperatur, kurz MRT, ist die kühlende Wirkung der Vegetation deutlich erkennbar. Überlagert wird der Einfluss der Bäume dabei mit dem Einfluss der Verschattung durch Gebäude. Im Bestand ist im Bereich nordwestlich der Paketposthalle der lokale Effekt durch die Baumreihen und eine größere Baumgruppe sichtbar. Während auf den offenen Flächen die MRT bei 68°C liegt, beträgt sie in den Baumreihen ca. 50°C und in den größeren Baumgruppen nur 35°C. Im B-Plan 1926a werden im selben Areal MRTs über 70°C erreicht. Mit B-Plan 2147 gibt es auf dem Areal deutlich größere Flächen mit MRTs unter 40°C. Die zeitweise Verschattung durch den Gebäudeschatten der Hochhäuser verbessert zusammen mit der dichten Baumbepflanzung und der geänderten Bodenbeschaffenheit den Komfort an Hitzetagen deutlich. Es ist hierbei anzumerken, dass der dargestellte kühlende Kernschatten der Hochhäuser über den Tag von West nach Ost wandert. Daher sind die geplanten Baumpflanzungen hilfreich, um die teil-besonnten Bereiche zu verschatten.

Bäume bieten sowohl durch ihren Schattenwurf einen wirksamen Schutz gegen die direkte solare Einstrahlung in ihrer Nähe, ebenso reduzieren sie lokal die mittlere Strahlungstemperatur aufgrund der durch die Evapotranspiration des Laubwerks reduzierten Oberflächentemperaturen. Durch diese Effekte kann in unmittelbarer Nähe auch die Lufttemperatur positiv beeinflusst werden, wobei die Reduzierung der Lufttemperatur wesentlich geringer ausfällt als die der Strahlungstemperatur und die Auswirkung lokal sehr stark begrenzt ist.

6.3 Auswirkung der Fassadenbegrünung (Oberflächentemperaturen der Fassade)

Die Analyse der Oberflächentemperatur der Fassade zeigt, dass die Bereiche im unmittelbaren Schatten der Fassadenbegrünung deutlich kühler sind, als andere zur Sonne exponierte Bereiche. Insbesondere in nach Süden ausgerichteten Bereichen, entsteht ein Temperaturunterschied von ca. 30°C. Fassadenbegrünung wirkt aufgrund der kühleren Oberflächentemperatur der Vegetation kühlend bis zu einem Abstand von 2-3 m von der Fassade, mit zunehmenden Abstand wird der Effekt jedoch merkbar geringer, da eine Person im langwelligen (Infrarot-) Strahlungsaustausch mit allen umgebenden Oberflächen steht (wie Gehwege, Himmel, andere Gebäudeoberflächen usw.) und die anderen Oberflächen mit zunehmendem Abstand vom Fassadengrün die mittlere Strahlungstemperaturen dominieren. Bei Innenhöfen oder engen Straßen ist somit ein höherer Kühleffekt zu erzielen als bei offenen Plätzen.

Die Randbedingungen zur Fassadenbegrünung sind in Abschnitt 2.8 dokumentiert. Abbildung 28 wird hier als Abbildung 58 wiederholt gezeigt, um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern.

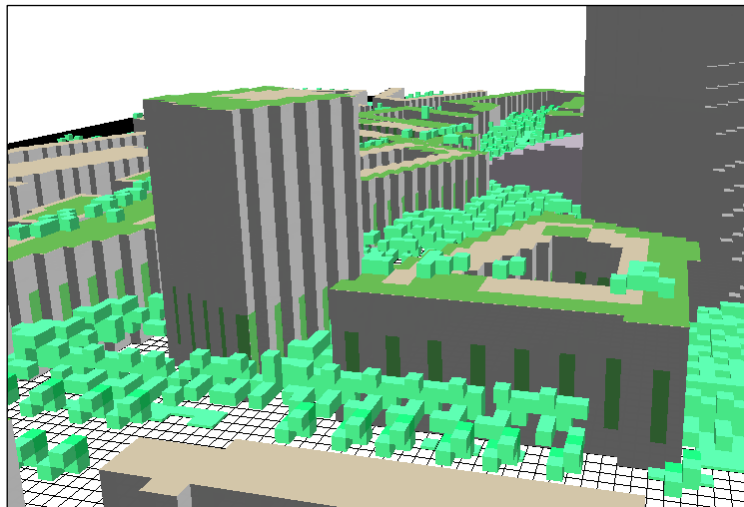


Abbildung 58: Fassadenbegrünung B-Plan 2147 (Beispiel)

20. Juli - 14:00 Uhr

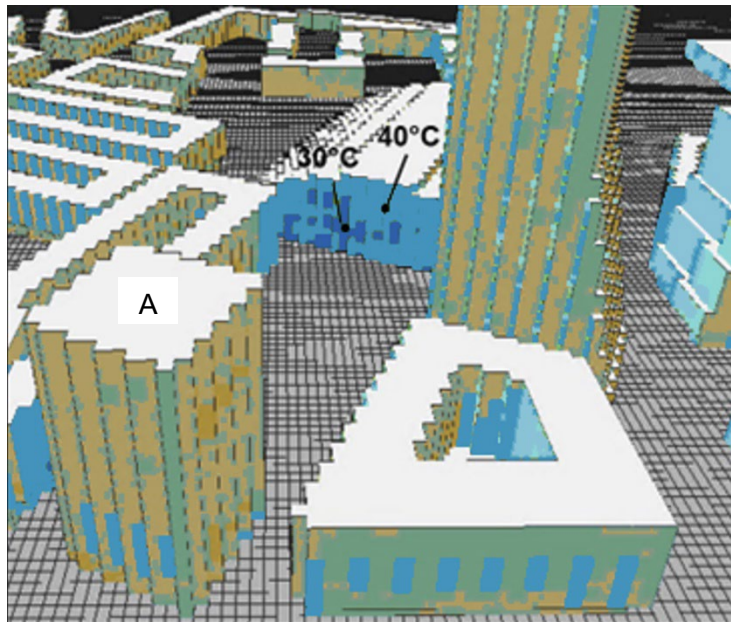


Abbildung 59: Oberflächentemperatur der Fassade: Blick von Westen

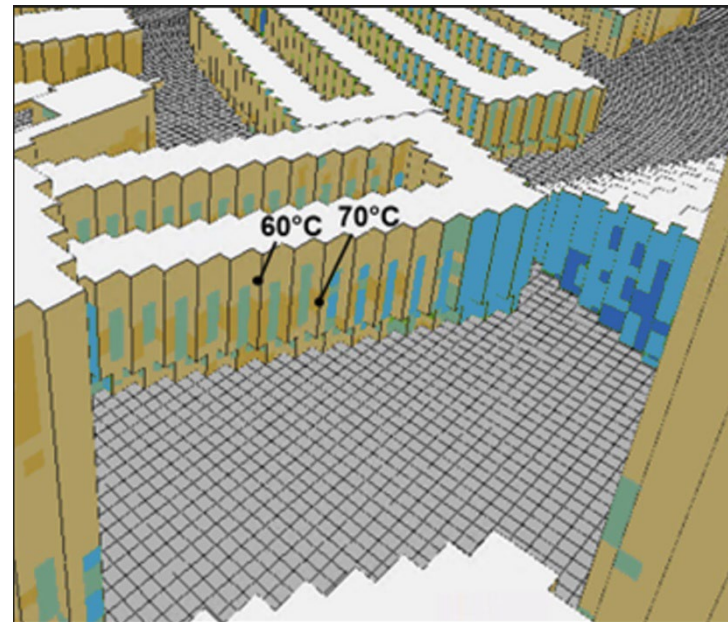
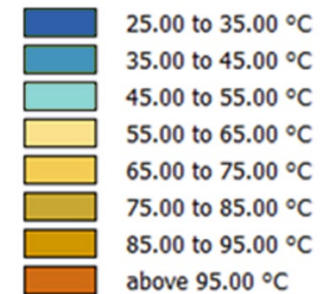


Abbildung 60: Oberflächentemperatur der Fassade: Blick von Südwesten

Oberflächentemperatur



Zum Auswertungszeitpunkt um 14 Uhr, sind die Süd- und Südwestfassaden sonnenbeschienen. Die streifenförmig angeordnete Fassadenbegrünung hebt sich durch ihre geringere Temperatur in den West- und Südwestansichten deutlich von der nicht begrünten Fassade ab. Die Oberflächentemperatur unterscheidet sich an Gebäude A um ca. 20 K. Die Westfassade der Paketposthalle ist insgesamt kühler, da die gesamte Fassade zum Zeitpunkt der Auswertung durch das Hochhaus verschattet wird. Begrünte Flächen auf allen Fassaden sind maximal 50°C warm während nicht begrünte Fassadenflächen sich auf bis zu 70°C erwärmen. Es ist hierbei anzumerken, dass der dargestellte kühlende Kernschatten der Hochhäuser über den Tag von West nach Ost wandert. Eine Fassadenbegrünung, die ganztägig die Oberflächentemperaturen der Fassaden reduziert, ist sicherlich sinnvoll.

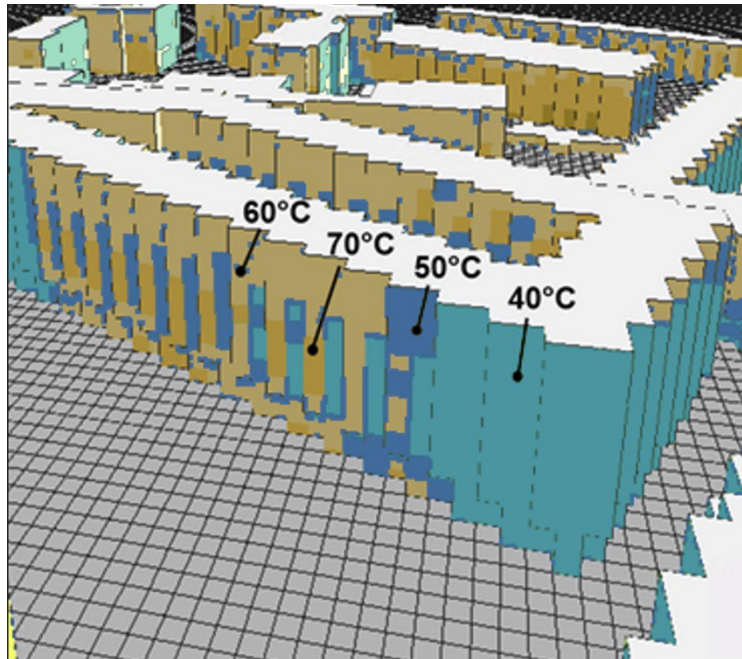


Abbildung 61: Oberflächentemperatur der Fassade: Blick von Süden

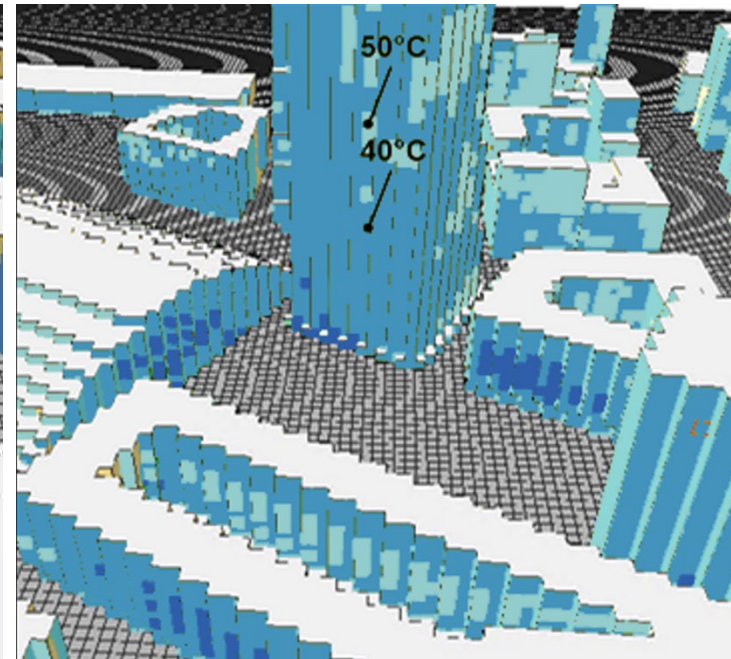
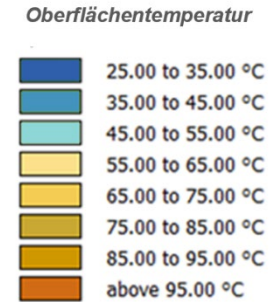


Abbildung 62: Oberflächentemperatur der Fassade: Blick von Norden



An den Südfassaden beträgt der Unterschied zwischen den begrünten und nicht begrünten Fassadenoberflächen bis zu 30 K. Die Nordfassaden sind mit durchschnittlich ca. 40°C wesentlich kühler als die restlichen Fassaden. Begrünte Flächen sind hier maximal 10 K kühler als nicht begrünte Flächen. In Abbildung 61 ist der rechte Teil des Gebäudes im Vordergrund durch die benachbarte Bebauung verschattet und dadurch insgesamt kühler.

Die Fassadenbegrünung wirkt kühlend auf die MRT in 2-3 m Abstand zur Fassade. Für größere Freiflächen sind Bäume das wichtigste Instrument zur Verbesserung des thermischen Komforts.

6.4 Fazit zum kühlenden Effekt der Vegetation

In Tabelle 8 sind beispielhaft für den westlichen Vorplatz der Paketposthalle die Ergebnisse der für den thermischen Komfort relevanten Kenngrößen Lufttemperatur, Luftfeuchte und mittlere Strahlungstemperatur (MRT) zusammengefasst. Die Änderung der Vegetation (Grünflächen, Fassadenbegrünung, Bäume) und die höhere Verschattungswirkung (Bebauung + Baumstellungen) beeinflusst vor allem die MRT.

Tabelle 8: Lufttemperatur, Luftfeuchte und mittlere Strahlungstemperatur (MRT) im Bereich nordwestlich der Paketposthalle, für die drei untersuchten Bebauungsvarianten (20. Juli – 14:00)

Variante	Lufttemperatur	Relative Feuchte	MRT
Bestand	41 °C	10%	68 °C
B-Plan 1926a	41 °C	10%	70 °C
B-Plan 2147	38 °C	10%	32 °C

Im B-Plan 2147 wird durch die zusätzliche dichte Bepflanzung (Grünflächen, Dach- und Fassadenbegrünung, Baumpflanzungen), sowie auch durch die Verschattungswirkung der dichteren Bebauung ein deutlich besserer thermischer Komfort an Hitzetagen ermöglicht. Es ist hierbei zu beachten, dass der Schattenwurf der Gebäude über den Tag von West nach Ost wandert, daher sind die zusätzlichen Schattenwürfe der geplanten Baumpflanzungen hilfreich, um die teil-besonnten Bereiche länger vor der Sonne zu schützen.

7 Mikroklima: Außen-Komfort Ergebnisse

Die Auswirkungen des vorgeschlagenen Entwurfs B-Plan 2147 mit dem durch die Baumplatzierungen geschützten Quartiersplatz und Freiräumen sind in der PET-Berechnung (physiologisch empfundene Temperatur) aufgrund der Verringerung der direkten Sonneneinstrahlung und der reduzierten Strahlungstemperatur des Laubes signifikant.

Durch die Reduzierung des PET um bis zu 12°C in einigen Gebieten, und ca. 4 °C im Durchschnitt für den gesamten Standort, wird der thermische Komfort für Fußgänger und Fußgängerinnen im Freien deutlich verbessert und auch die extremen Wärmestressbedingungen im PPA-Projektareal weitgehend eliminiert, 100% eliminiert in einigen Bereichen des PPA Quartiers-Park.

Der PET-Durchschnitt wird über den gesamten Tag um 2,7 °C gekühlt, d.h. von 29,8 °C (Bestand) auf 27,1 °C (B-Plan 2147).

Die gutachterlichen Untersuchungen zeigen ebenso, dass keine negativen Einflüsse des geplanten B-Planes 2147 auf das Mikroklima der angrenzenden Nachbarschaft zu erwarten sind.

7.1 Potenzielle Temperatur

Die folgende Abbildung zeigt das durchschnittliche potenzielle Temperaturprofil für das gesamte untersuchte PPA-Gebiet für die drei Entwurfsszenarien. **Der endgültige Entwurfsfall B-Plan 2147 hält tagsüber aufgrund der Begrünung eine um bis zu 2 °C niedrigere potenzielle Temperatur aufrecht als die beiden anderen Fälle.** In den Abendstunden wird aufgrund der dichteren Bebauung und dem dichteren Baumbestand hingegen die Wärme etwas länger gehalten, da es einen geringeren Wärmeaustausch (konvektiv und Strahlungswärme) mit der kühleren Umgebungstemperatur gibt.

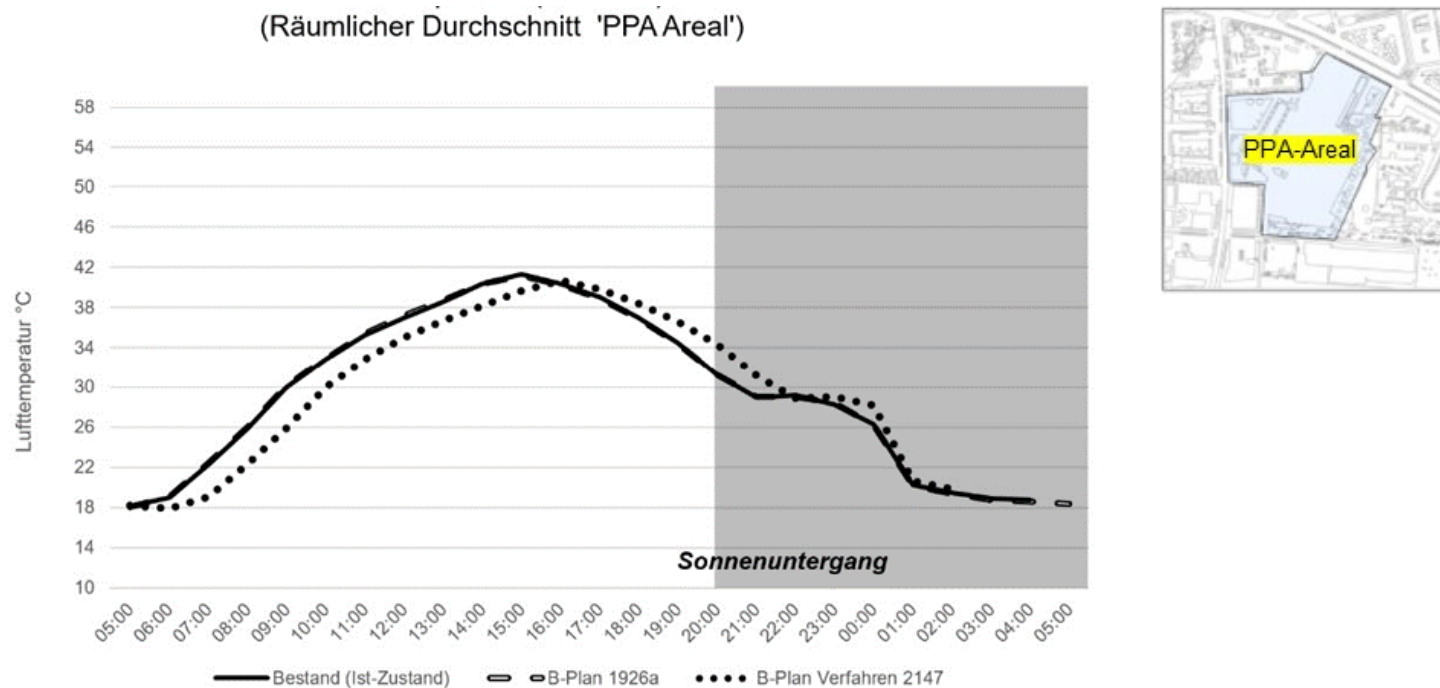


Abbildung 63: Potenzielle Temperatur Tagesprofil

Die folgende Abbildung zeigt das Kühlpotenzial oder die stündliche Reduzierung der potenziellen Lufttemperatur der beiden Entwurfscfälle B-Plan 1926a und endgültiger B-Plan 2147 im Vergleich zum Bestandsfall. Die ersten 3 Stunden der Grafik sind hierbei aufgrund des Modell Spin-ups nicht zu beachten. Diese Abbildung zeigt deutlich, dass die durch B-Plan 2147 erreichte Temperaturreduzierung den größten Teil des Tages 2 °C beträgt, mit einem Maximum von 4 °C, während die Temperatur von B-Plan 1926a keinen Unterschied zum Bestandsfall darstellt.

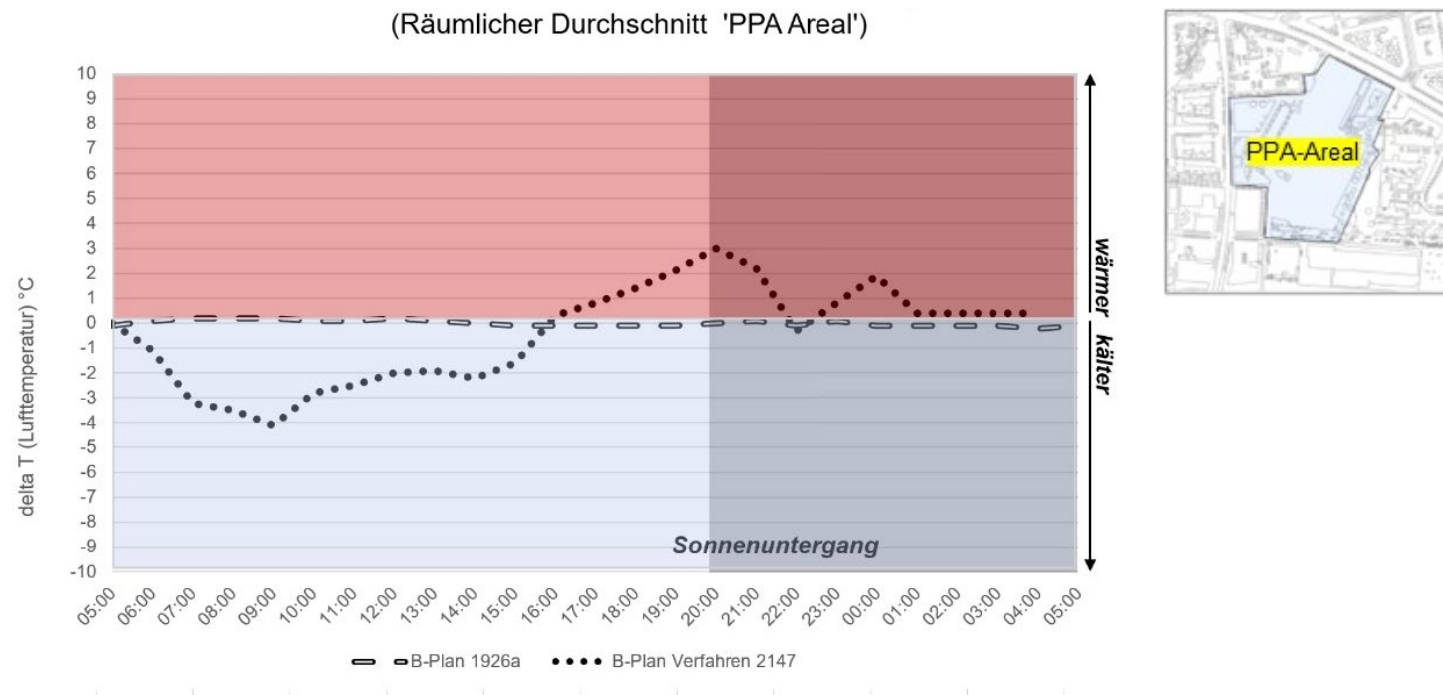


Abbildung 64: Kühlungspotential (Potenzielle Temperatur) Tagesprofil

In diesem Abschnitt werden drei repräsentative Stunden, 14:00, 22:00 und 04:00 Uhr, verwendet, um die Flächenverteilung der potenziellen Lufttemperatur über dem gesamten PPA-Gebiet für die drei in diesem Bericht untersuchten Entwurfsszenarien (Bestand, B-Plan 1926a und endgültiger B-Plan 2147) zu veranschaulichen. Entsprechend werden die Graphiken aus Abschnitt 6.2 wiederholt gezeigt.

20. Juli - 14:00 Uhr

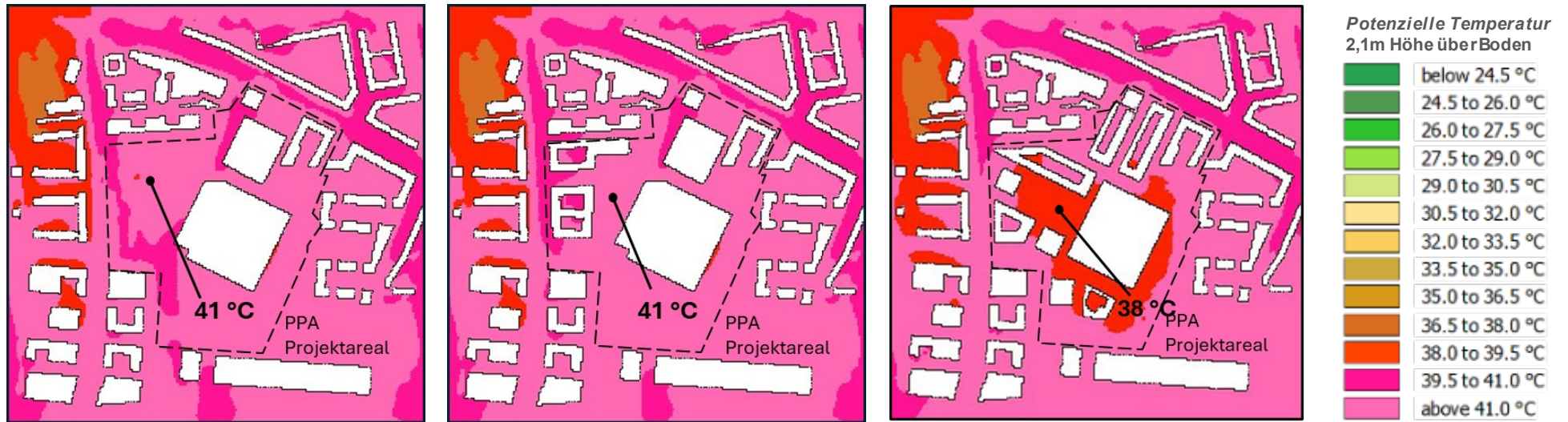


Abbildung 65: Potenzielle Temperatur 14:00 - Bestand

Abbildung 66: Potenzielle Temperatur 14:00 - B-Plan 1926a

Abbildung 67: Potenzielle Temperatur 14:00 - B-Plan 2147

Die Potenzielle Temperatur im PPA-Projektgebiet liegt im Bestandsgebiet und im Vorgängerszenario B-Plan 1926a aufgrund der hohen Sonneneinstrahlung in diesem Bereich über 40°C. Der vorgeschlagene Plan B-Plan 2147 verbessert die klimatischen Bedingungen des Entwurfs spürbar und reduziert die Potenzielle Temperatur im in der obenstehenden Grafik markierten PPA-Park um bis zu 3°C, aufgrund der konzentrierten Platzierung der Bäume mit dem schattenwerfenden Blätterdach und der höheren Verschattungswirkung durch die geplante Bebauung.

20. Juli - 22:00 Uhr

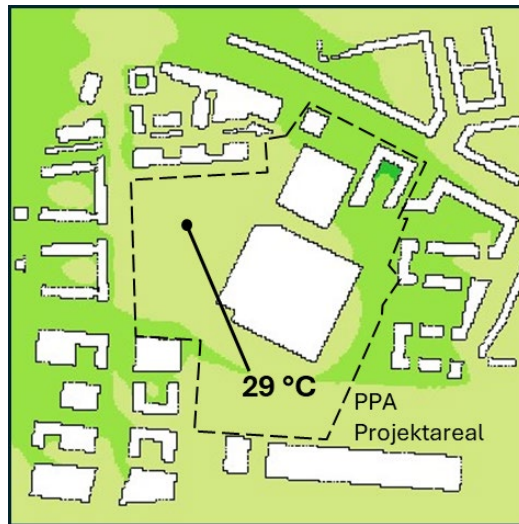


Abbildung 68: Potenzielle Temperatur 22:00 - Bestand

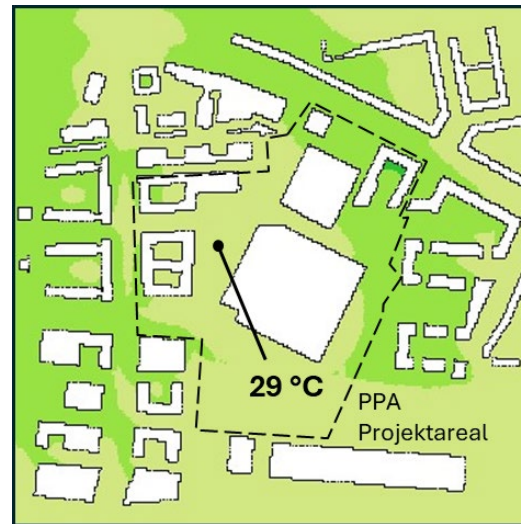


Abbildung 69: Potenzielle Temperatur 22:00 - B-Plan 1926a

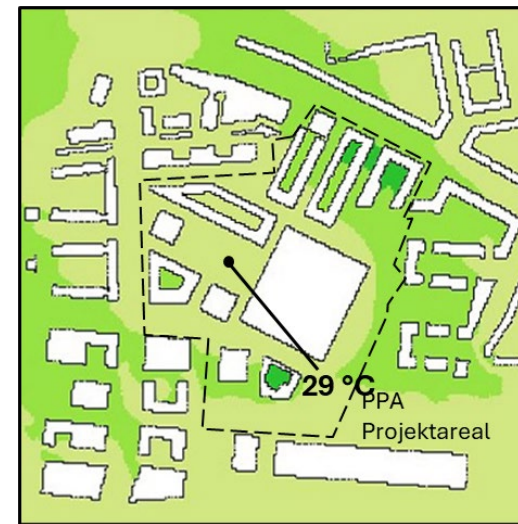
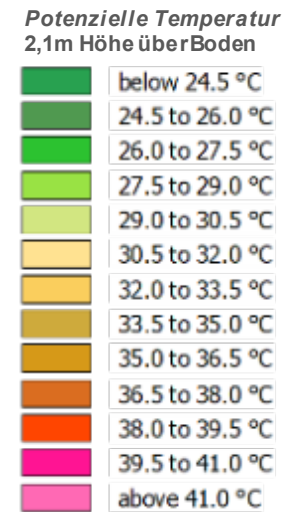


Abbildung 70: Potenzielle Temperatur - B-Plan 2147



In den frühen Nachtstunden ist die Potenzielle Temperatur in allen untersuchten Auslegungsfällen recht ähnlich, da die Temperatur nicht mehr durch die direkte Sonneneinstrahlung, sondern überwiegend durch die Umgebungslufttemperatur bestimmt wird.

21. Juli - 04:00 Uhr

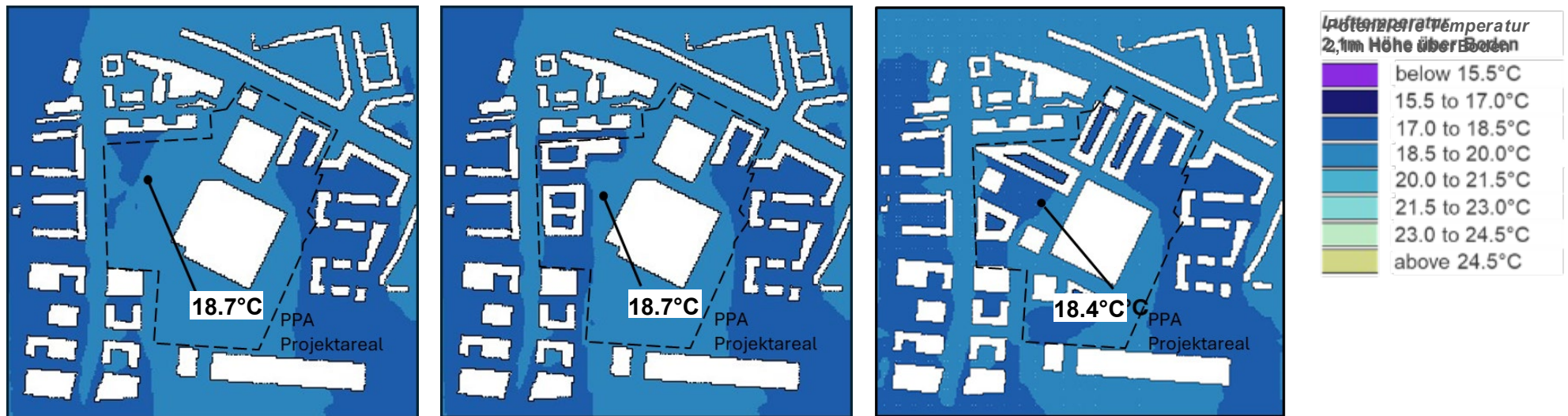


Abbildung 71: Potenzielle Temperatur 04:00 - Bestand

Abbildung 72: Potenzielle Temperatur 04:00 - B-Plan 1926a

Abbildung 73: Potenzielle Temperatur 04:00 - B-Plan 2147

Die Potenziellen Temperaturen in den frühen Morgenstunden zeigen im vorgeschlagenen Fall B-Plan 2147 einen minimal kühlere Gesamtumgebung. Generell sind die Nachttemperaturen in allen drei Szenarien als gleichwertig zu bezeichnen.

Trotz einer deutlich dichteren Bebauung im Fall B-Plan 2147 ist keine zusätzliche Erwärmung zu erwarten. Grund hierfür ist die gute thermische Isolierung der Gebäude. Es gibt wenig thermische Speichermasse außerhalb der Dämmebene, die nennenswert Wärme vom vorangegangenen Tag in der darauffolgenden Nacht abgeben kann.

Großmaßstäbliche städtische Wärmeinseleffekte werden in dem hier berechneten Modell nicht abgebildet, die modellierte Modelldomäne ist zu klein, um solche Effekte aufzuzeigen.

7.2 Menschlicher bioklimatischer Index (PET)

Die folgende Abbildung zeigt den durchschnittlichen Tagesverlauf der Potenziellen Lufttemperatur für das gesamte untersuchte PPA-Projektgebiet für die drei Entwurfsszenarien Bestand, B-Plan 1926a und endgültiger B-Plan 2147. Die ersten 3 Stunden der Grafik sind hierbei aufgrund des Modell Spin-ups nicht zu beachten. Es ist zu beobachten, dass die neue Bebauung des B-Plans 2147 mit ihren schattigen Innenhöfen und der großzügigen dichten Vegetation dazu beiträgt, das Mikroklima im Tagesverlauf erheblich zu verbessern. Der maximale PET-Wert (räumliches Mittel des PPA-Projektgeländes) in der neuen Bebauung unter den simulierten Wetterbedingungen ist während der heißesten Stunden des Tages bis zu 5 K kühler als im Szenario Bestand/B-Plan 1926a. Diese erreichen dagegen Temperaturen von bis zu 50°C oder mehr.

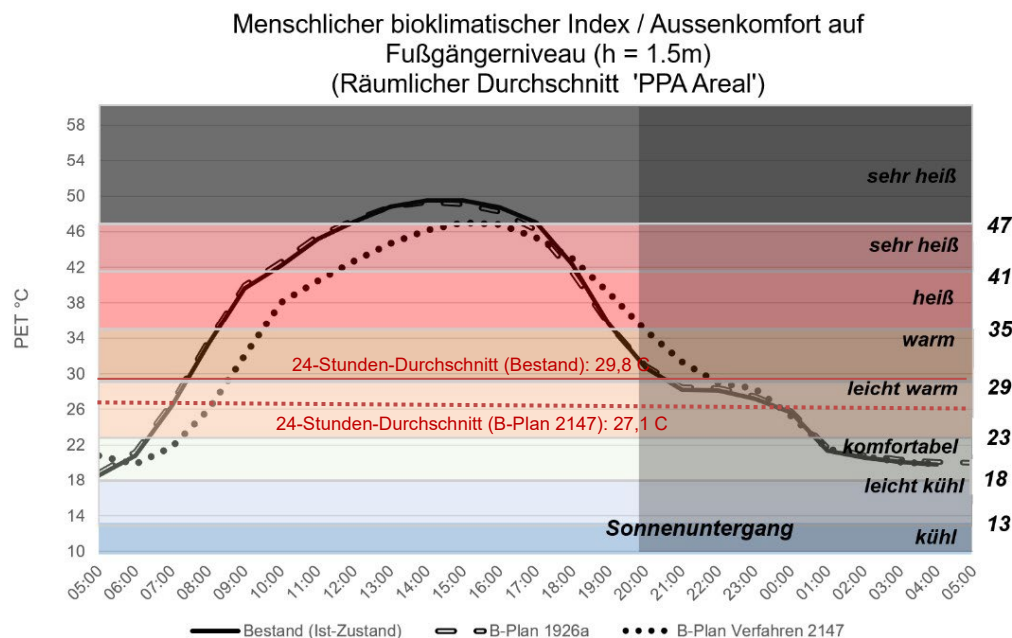


Abbildung 74: Menschlicher bioklimatischer Index PET Tagesprofil

Die folgende Abbildung zeigt die Anzahl der Stunden in jedem Komfortbereich im Laufe eines Tages, von 00:00 bis 00:00 Uhr des darauffolgenden Tages, also 24 Stunden. Für die Szenarien des Bestandes und des B-Plans 1926a wird die äußerst unangenehme Bewertung „sehr heiß“ für Temperaturen über 47°C für das Mikroklima für etwa 5-6 Stunden berechnet, d. h. von der Mittagszeit (12:00 Uhr) bis zu den frühen Abendstunden (17:30 Uhr). Der B-Plan 2147 weist jedoch keine Stunden über der 47°C-Grenze auf, und die heißen Stunden über 41°C sind im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien um 25 % reduziert.

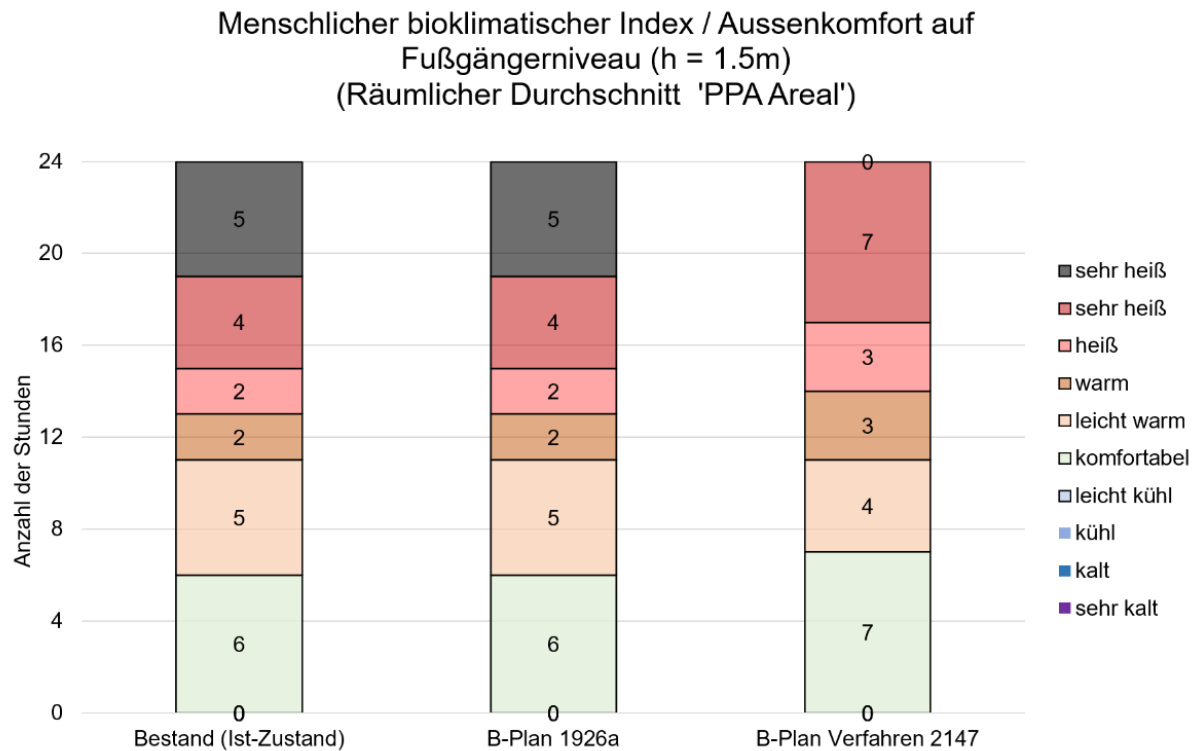


Abbildung 75: Menschlicher bioklimatischer Index PET Gesamtstunden

Die folgende Abbildung zeigt das Kühlpotenzial bzw. die stündliche Reduzierung des durchschnittlichen Menschlichen Bioklimatischen Index (PET) für das gesamte PPA-Projektgebiet der beiden Entwurfsszenarien B-Plan 1926a und des endgültigen B-Plans 2147 im Vergleich zum Bestandsszenario. Die ersten 3 Stunden der Grafik sind hierbei aufgrund des Modell Spin-ups nicht zu beachten. Diese Abbildung zeigt deutlich, dass die durch B-Plan 2147 erreichte Temperaturreduzierung am frühen Morgen bis zu 8°C und dann während der heißesten Stunden des Tages mindestens 2 bis 5°C beträgt, während B-Plan 1926a im Vergleich zum Bestandsszenario nur während einiger Stunden eine Reduzierung um 1°C aufweist. In den Abendstunden wird die Wärme aufgrund der höheren Bebauungsdichte und der dichten Baumstellung etwas weniger an die Umgebung abgegeben, daher ist es im B-Plan 2147 etwas wärmer als in den beiden anderen Varianten. Im 24-Stunden Durchschnitt ist im Vergleich zum Bestand der B-Plan 1926a mit PET +0.1°C beinahe gleichwertig, der B-Plan 2147 jedoch mit -1.26°C deutlich kühler.

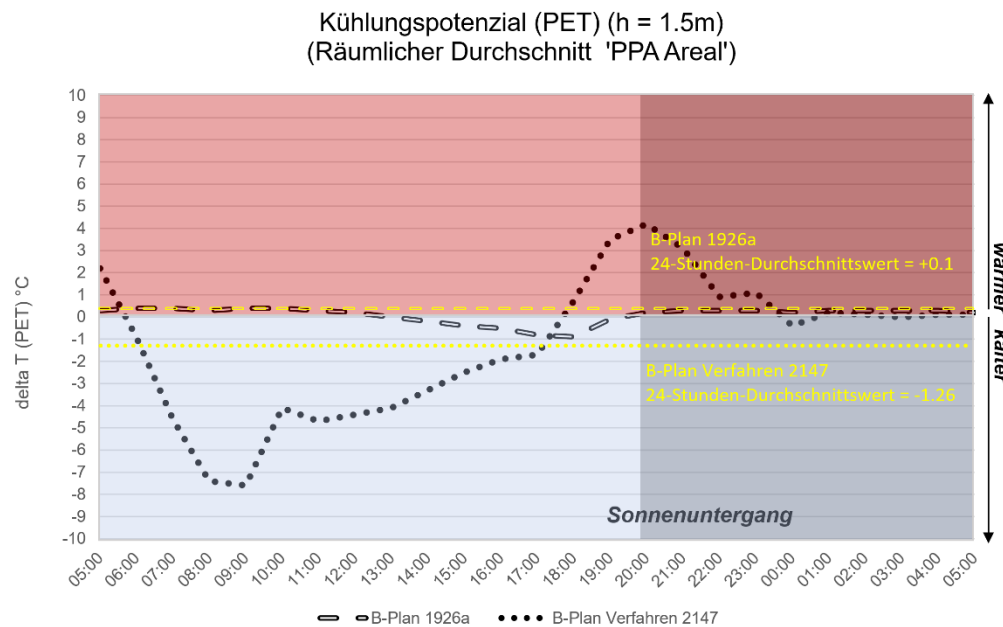


Abbildung 76: Kühlungspotential (PET) Tagesprofil

Für den Menschlichen Bioklimatischen Index (PET) werden ebenfalls drei repräsentative Stunden, 14:00, 22:00 und 04:00 Uhr, verwendet, um die Verteilung über das gesamte PPA-Areal für die drei in diesem Bericht untersuchten Entwurfsszenarien Bestand, B-Plan 1926a und endgültiger B-Plan 2147 darzustellen.

20. Juli - 14:00 Uhr

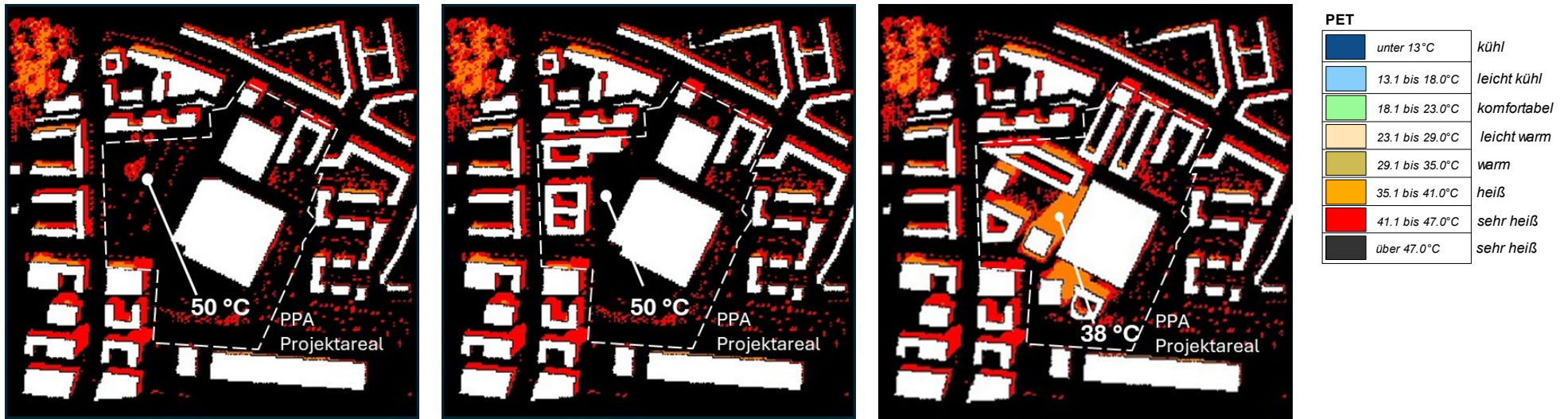


Abbildung 77: PET 14:00 - Bestand

Abbildung 78: PET 14:00 - B-Plan 1926a

Abbildung 79: PET 14:00 - B-Plan 2147

Die positiven Auswirkungen des vorgeschlagenen Entwurfs B-Plan 2147, der aufgrund der deutlich dichteren Bebauung und der größeren Anzahl von Bäumen stärker verschattet wird, sind bei der Betrachtung des PET deutlich sichtbarer als bei der Lufttemperatur, da sie in direktem Zusammenhang mit der Verringerung der direkten Sonneneinstrahlung und der verringerten Strahlungstemperatur der Vegetation stehen. Wenn man darüber hinaus nicht den durchschnittlichen PET des gesamten PPA-Projektbereichs, sondern beispielhaft einen einzelnen Bereich im PPA-Park betrachtet, wie in Abbildung 79 oben markiert, beträgt die erreichte Reduzierung mehr als 12 Kelvin, wodurch

in diesem Bereich die Zeitspannen mit der PET Definition „sehr heiß“ vollständig vermieden werden können, was einer Reduzierung von 100 % im Vergleich zu den Szenarien Bestand und B-Plan 1926a entspricht.

Die Dachbegrünung hat auf der Dachebene ebenso eine positive Auswirkung auf die PET, da die Dachflächen jedoch nicht im direkten Strahlungsaustausch mit der Fußgängerebene haben, ist hier keine positive Beeinflussung erkennbar. Die Dachflächen werden in diesem Bericht nicht separat dargestellt, da die kleinteiligen Dachaufbauten (Technikzentralen, Dachpergolen) nicht detailliert im Simulationsmodell abgebildet wurden. Da der thermische Komfort auf der Dachebene stark von der solaren Einstrahlung und den dortigen lokalen Verschattungsmaßnahmen dominiert wird, sind Aussagen aufgrund der Modell-Vereinfachungen nicht zielführend.

20. Juli - 22:00 Uhr

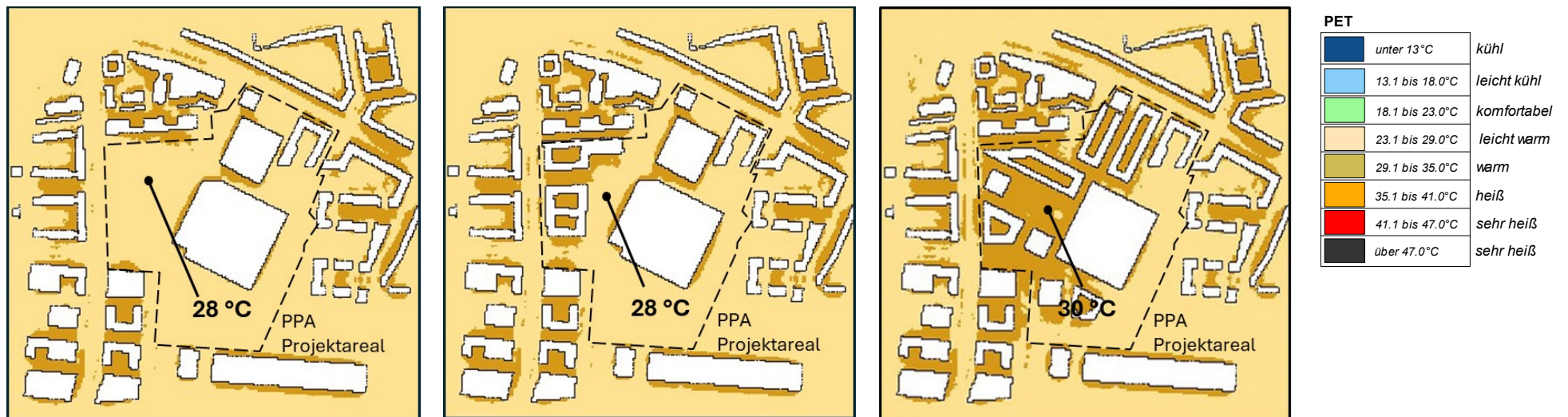


Abbildung 80: PET 22:00 - Bestand

Abbildung 81: PET 22:00 - B-Plan 1926a

Abbildung 82: PET 22:00 - B-Plan 2147

Die Entwicklung des PET im B-Plan 2147 während der Nacht spiegelt den Einfluss der Bäume, der dichteren Bebauung und der lokal reduzierten Durchlüftung wider. Auch die Abschirmung von den kühlen Nachthimmelstemperaturen sorgt für lokal geringfügig höhere

Temperaturen. Die Baumkronen und die dichtere Bebauung reduzieren die Wärmeabfuhr durch Konvektion und Wärmeabstrahlung gegen die kühlere Atmosphäre, dadurch ist die PET in der Variante B-Plan 2147 etwas wärmer als in den beiden anderen untersuchten Varianten. Dieser Effekt wird als unkritisch angesehen.

21. Juli - 04:00 Uhr

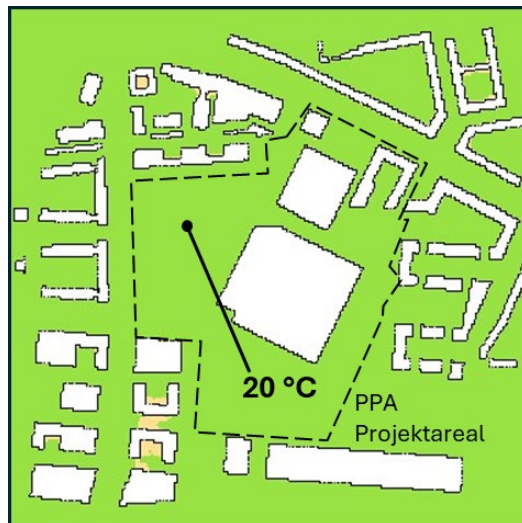


Abbildung 83: PET 04:00 - Bestand

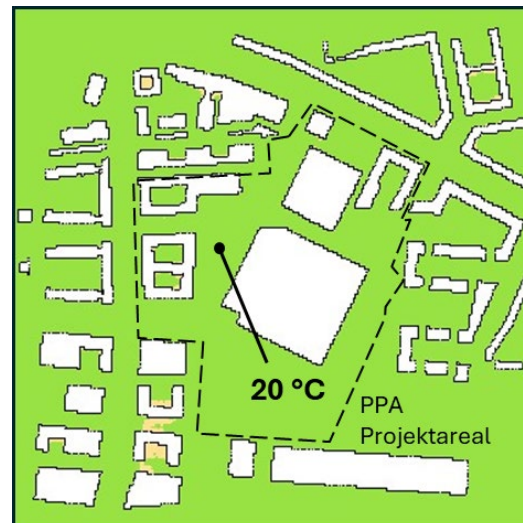


Abbildung 84: PET 04:00 - B-Plan 1926a

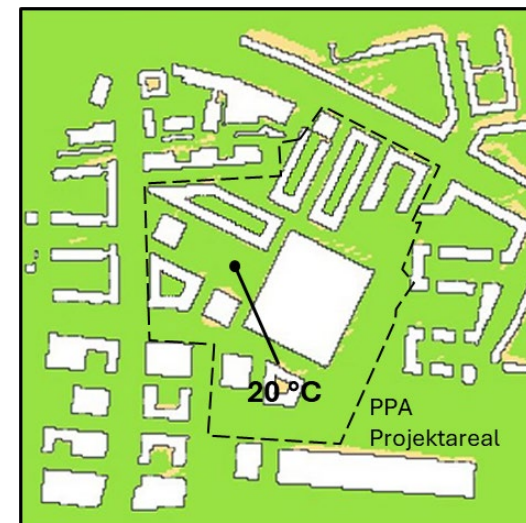


Abbildung 85: PET 04:00 - B-Plan 2147

PET	
unter 13.0°C	kühl
13.1 bis 18.0°C	leicht kühl
18.1 bis 23.0°C	komfortabel
23.1 bis 29.0°C	leicht warm
29.1 bis 35.0°C	warm
35.1 bis 41.0°C	heiß
41.1 bis 47.0°C	sehr heiß
über 47.0°C	sehr heiß

In den frühen Morgenstunden ist auch in der PET-Betrachtung wie auch bei den Lufttemperaturen kein signifikanter Unterschied feststellbar, so dass die nächtliche Abkühlung durch Temperaturabsenkung auch im vorgeschlagenen Entwurf erreicht wird.

8 Appendix

8.1 Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen und auf Dächern

07:00 Uhr

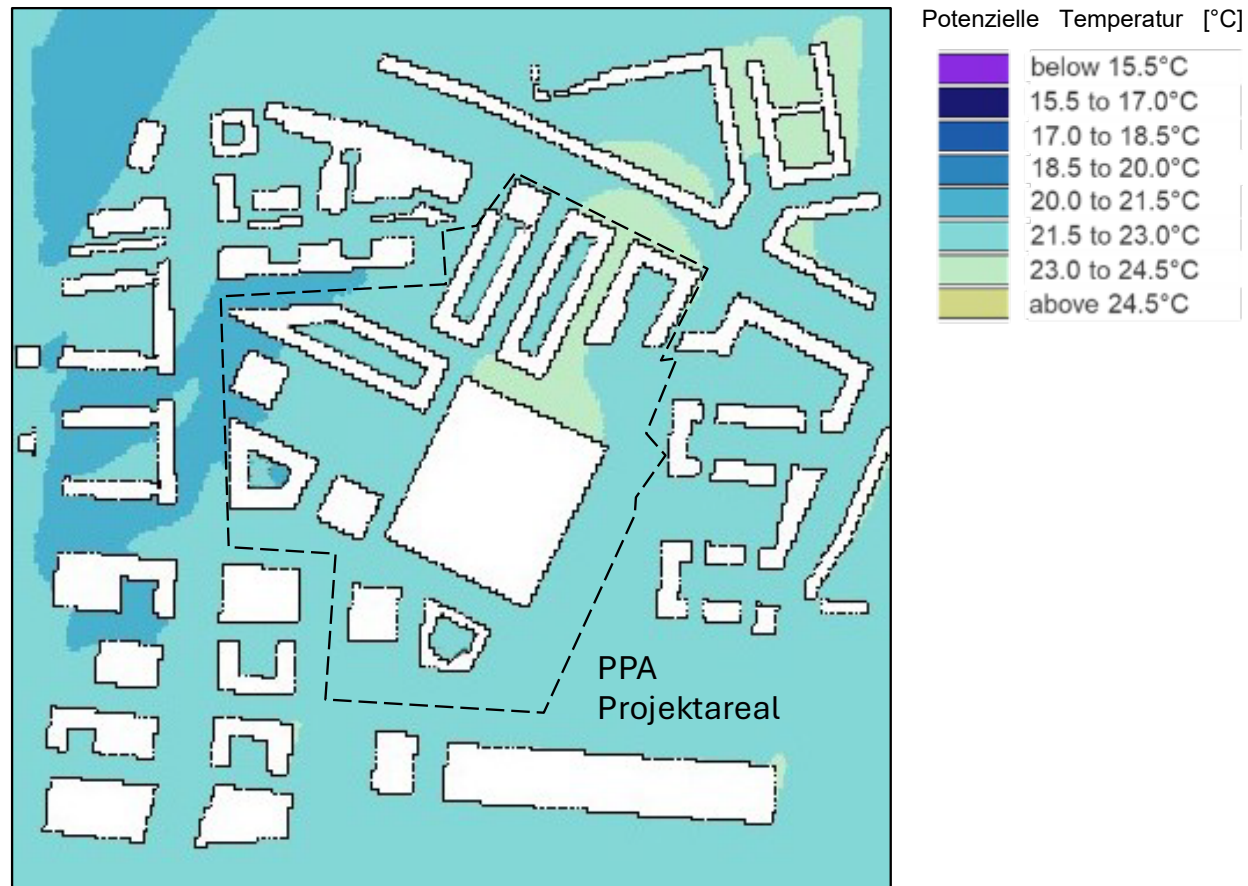


Abbildung 86: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (20. Juli - 07:00)

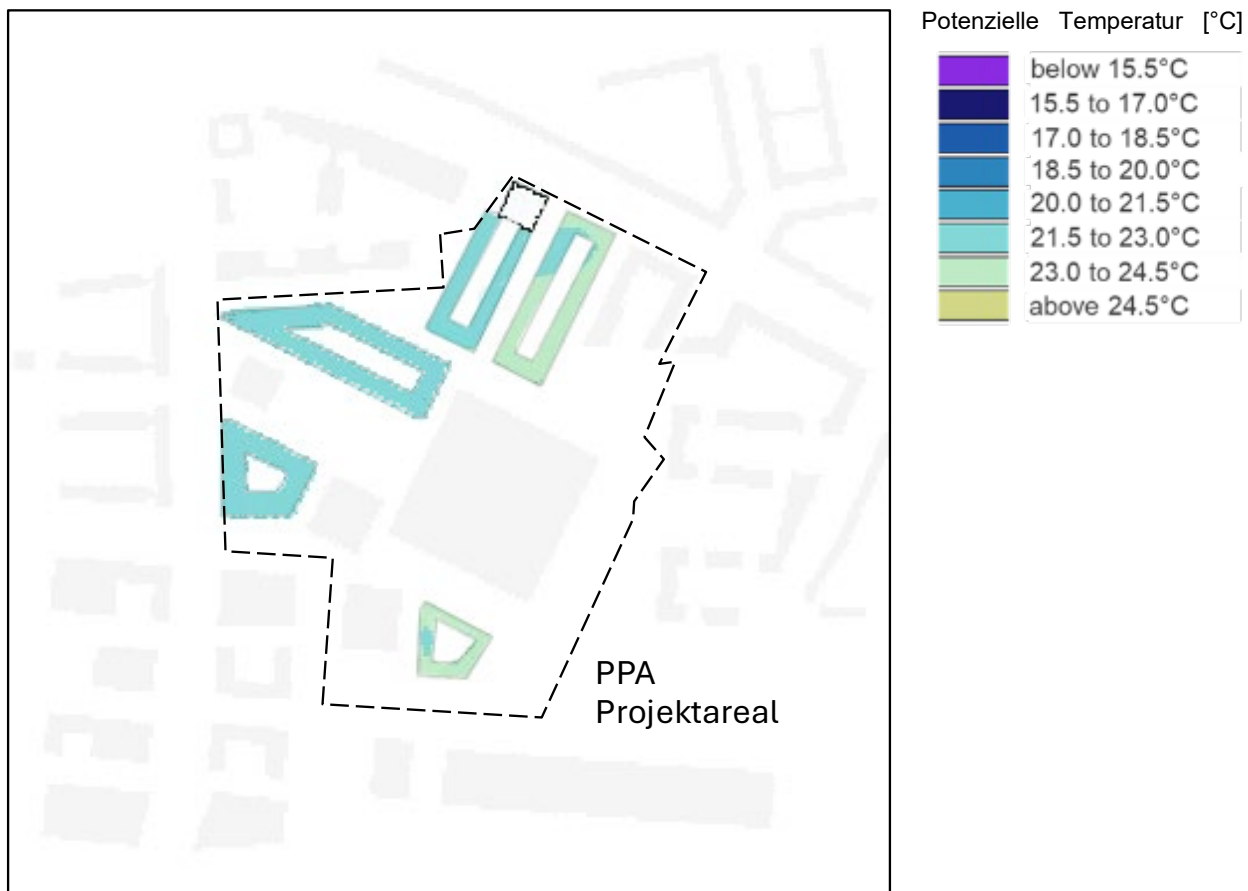


Abbildung 87: Potenzielle Temperatur auf Dächern (20. Juli - 07:00)

11:00 Uhr

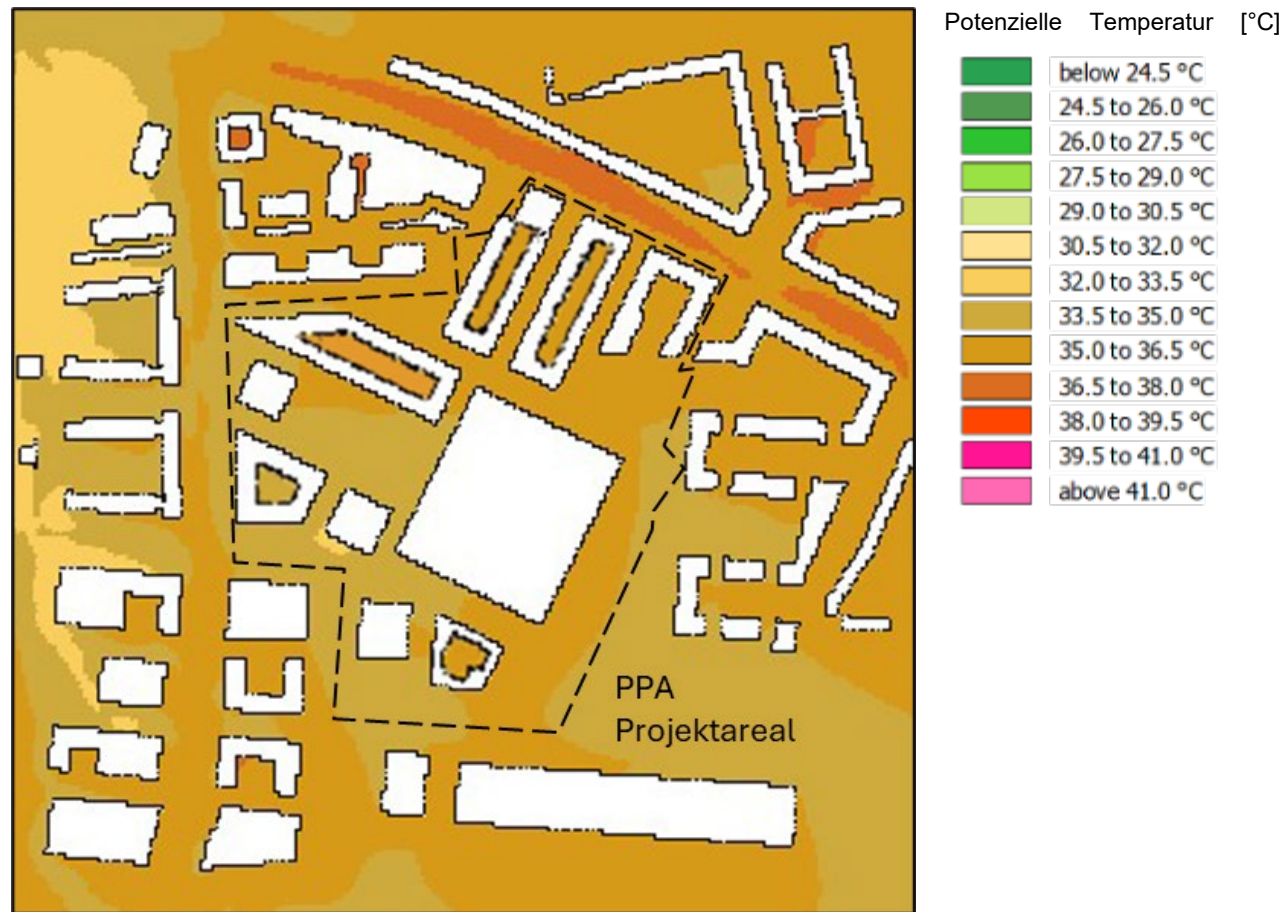


Abbildung 88: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (20. Juli - 11:00)

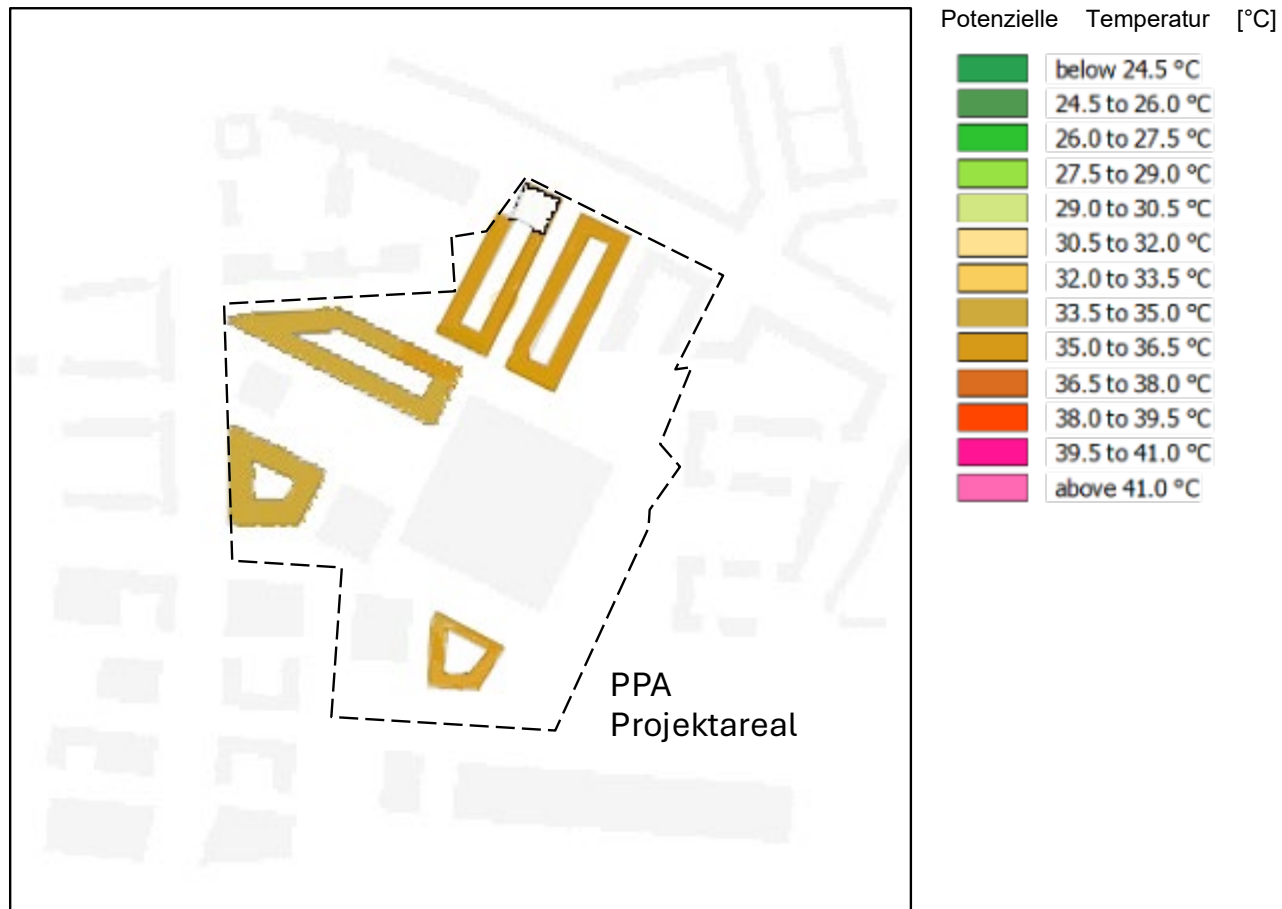


Abbildung 89: Potenzielle Temperatur auf Dächern (20. Juli - 11:00)

15:00 Uhr

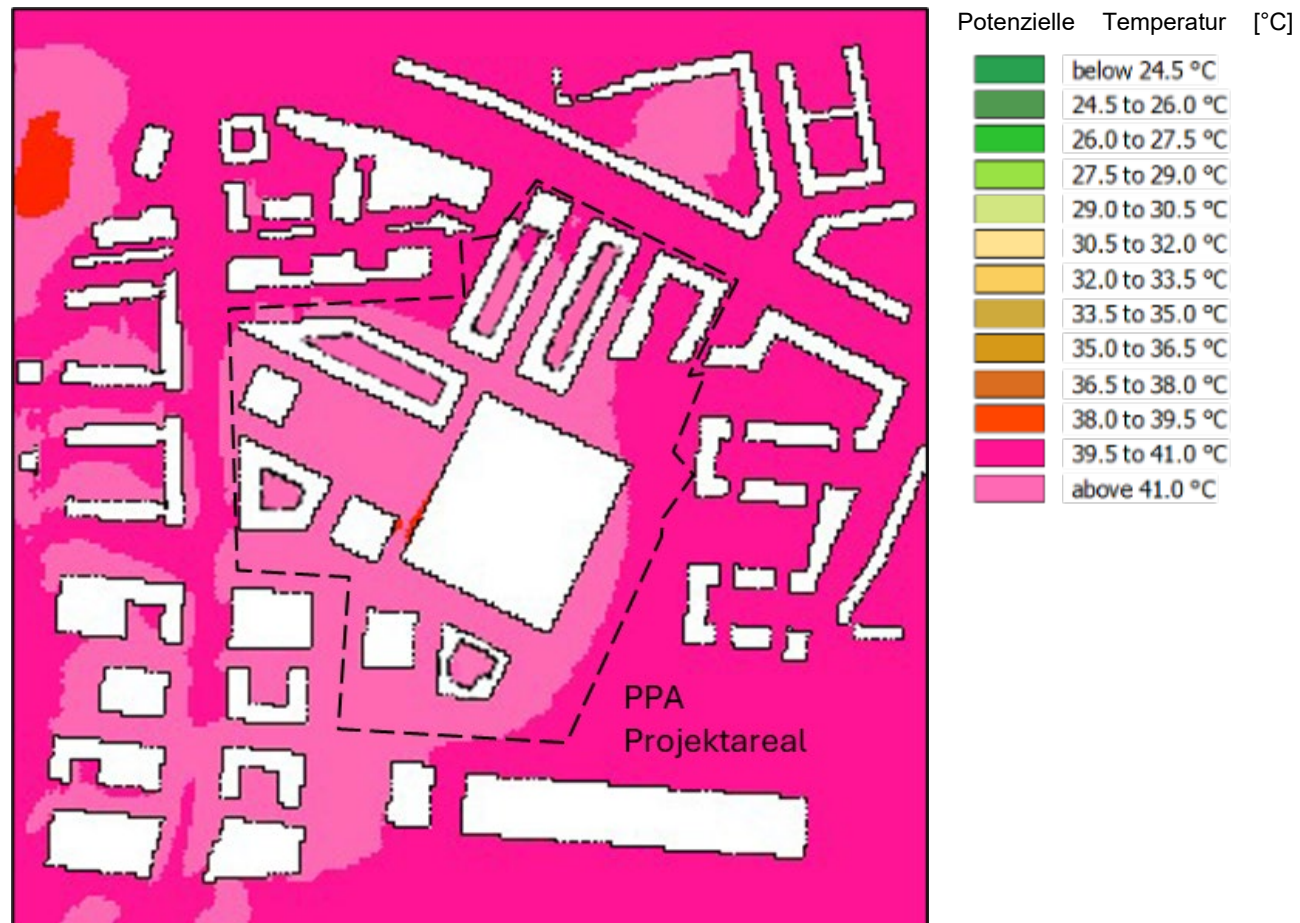


Abbildung 90: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (20. Juli - 15:00)

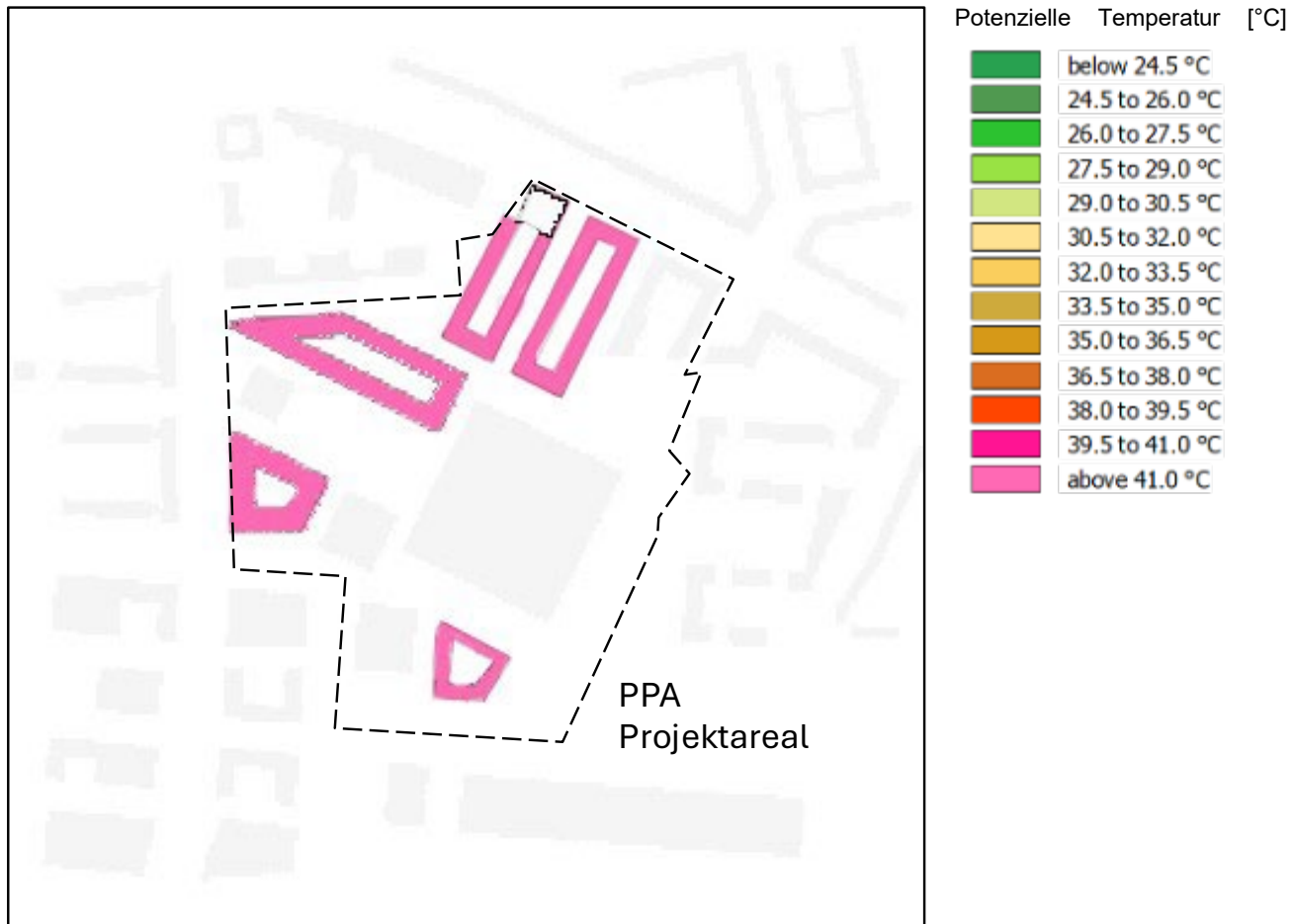


Abbildung 91: Potenzielle Temperatur auf Dächern (20. Juli - 15:00)

19:00 Uhr

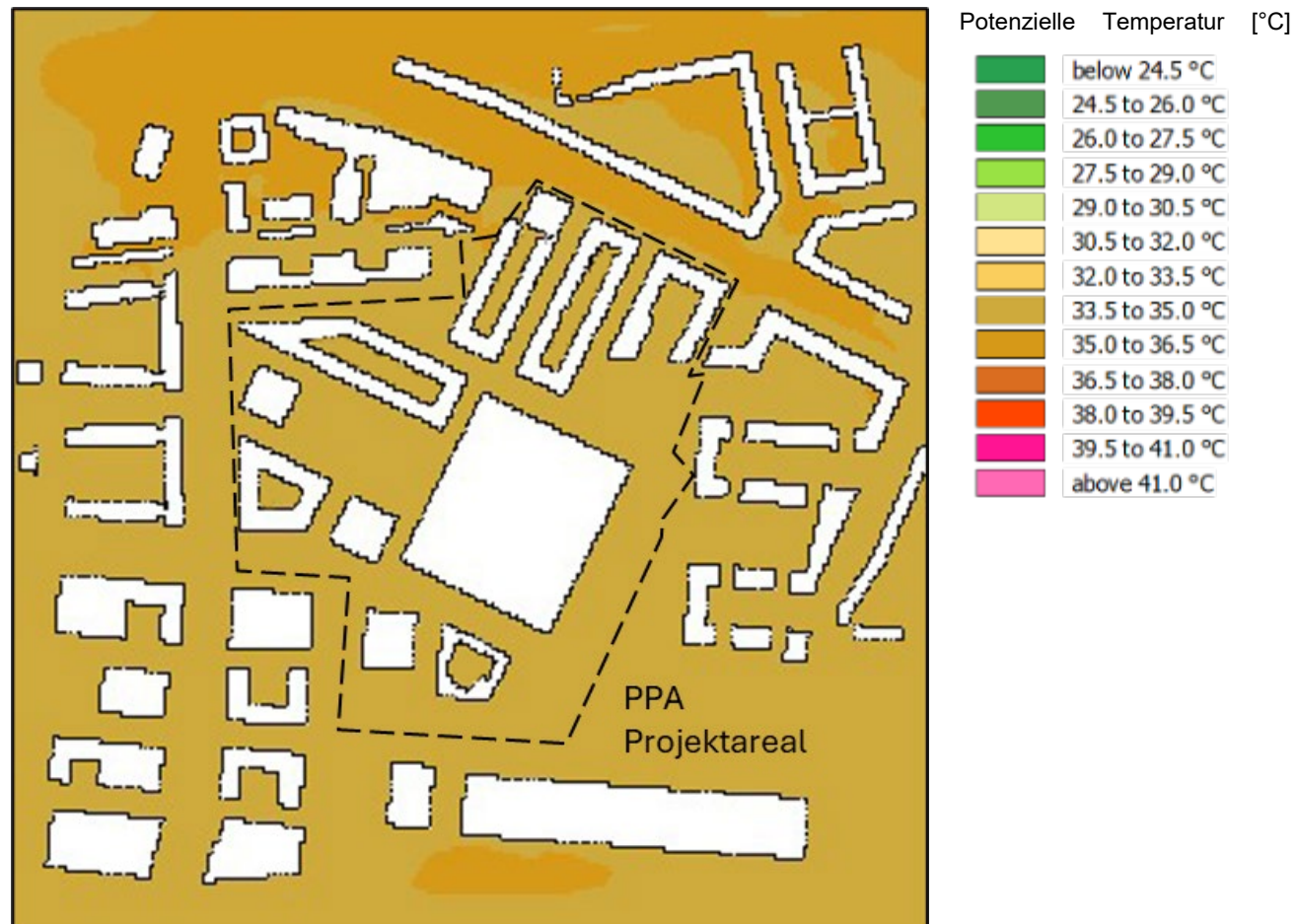


Abbildung 92: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (20. Juli - 19:00)

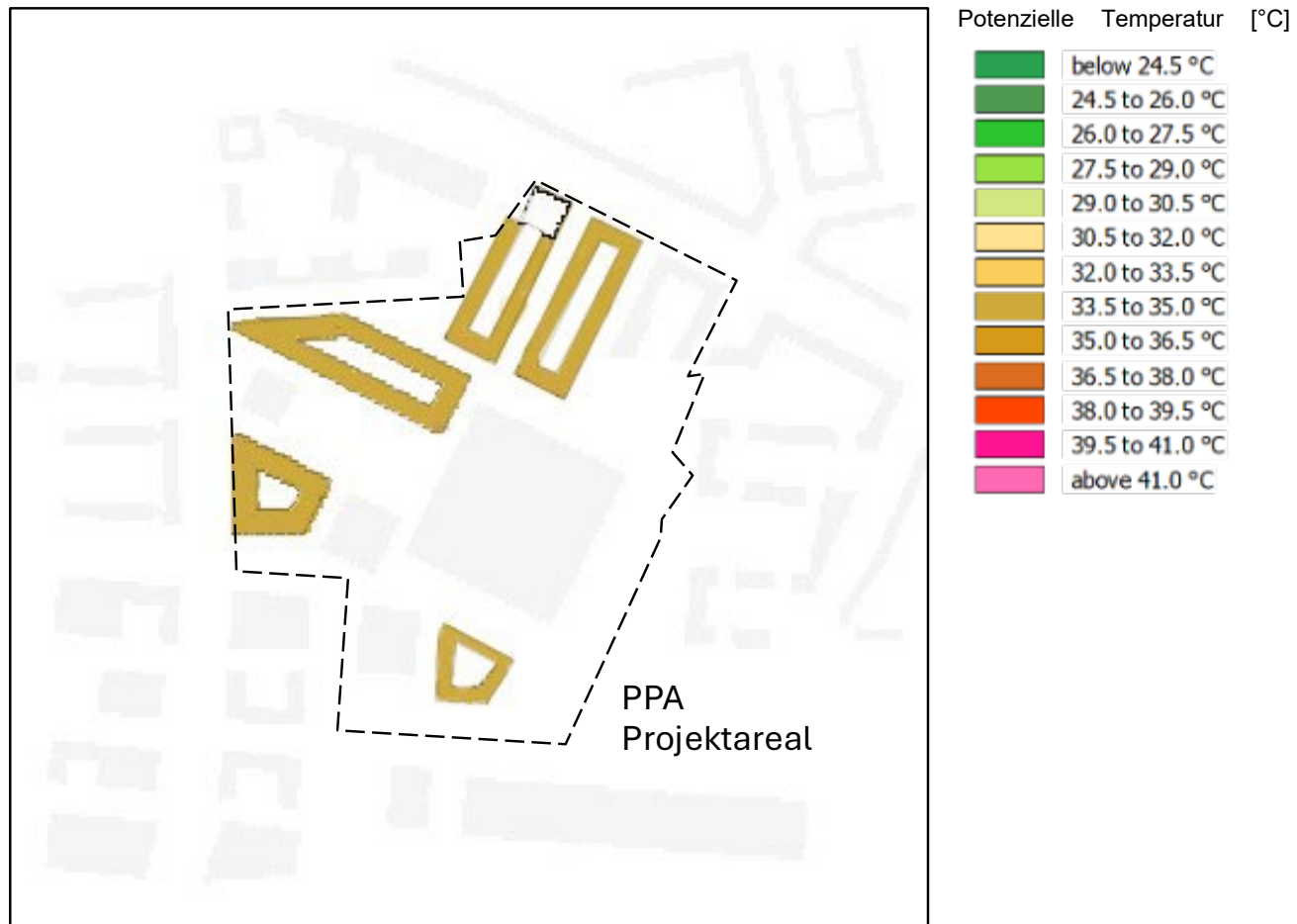


Abbildung 93: Potenzielle Temperatur auf Dächern (20. Juli - 19:00)

23:00 Uhr

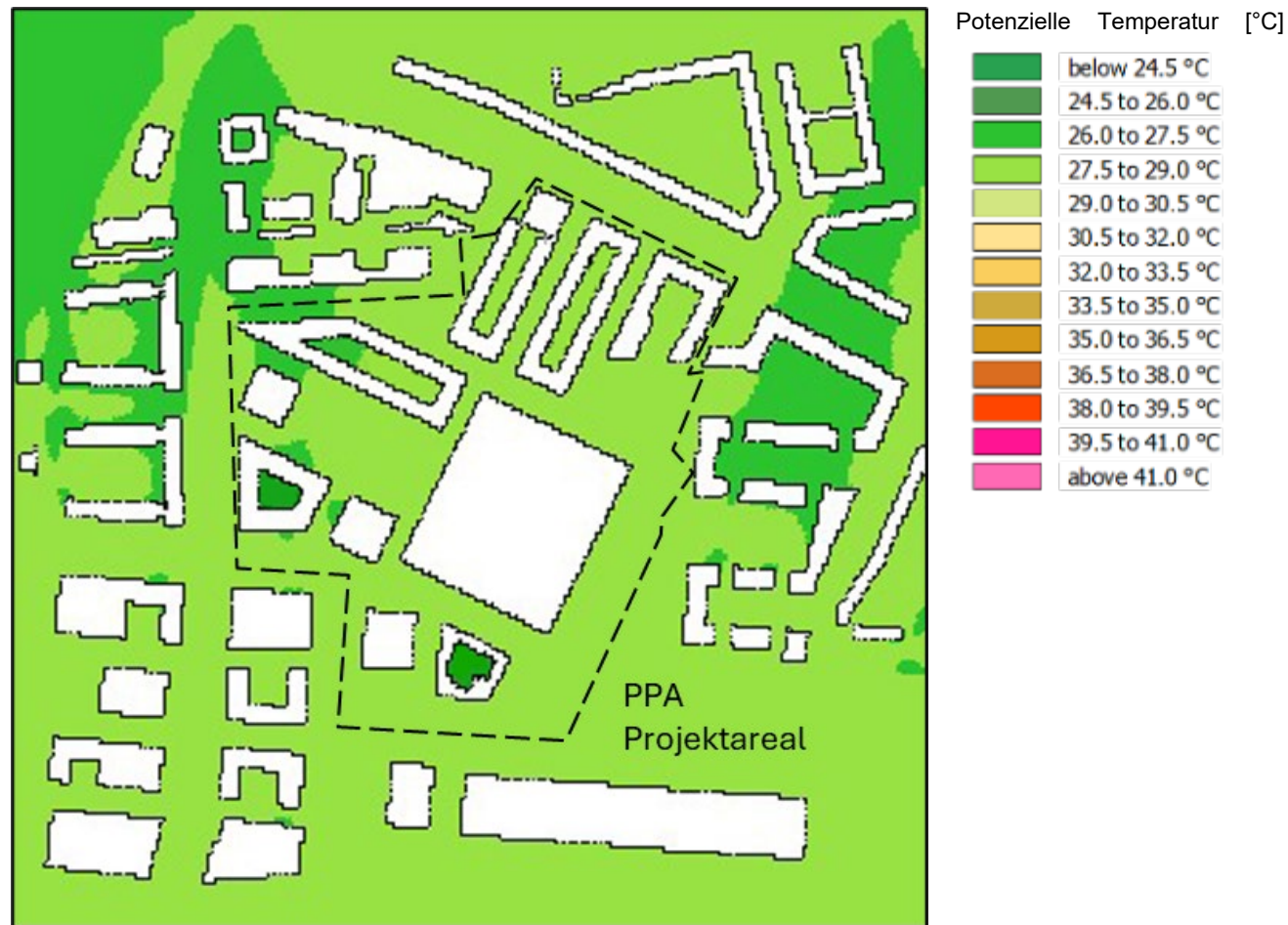
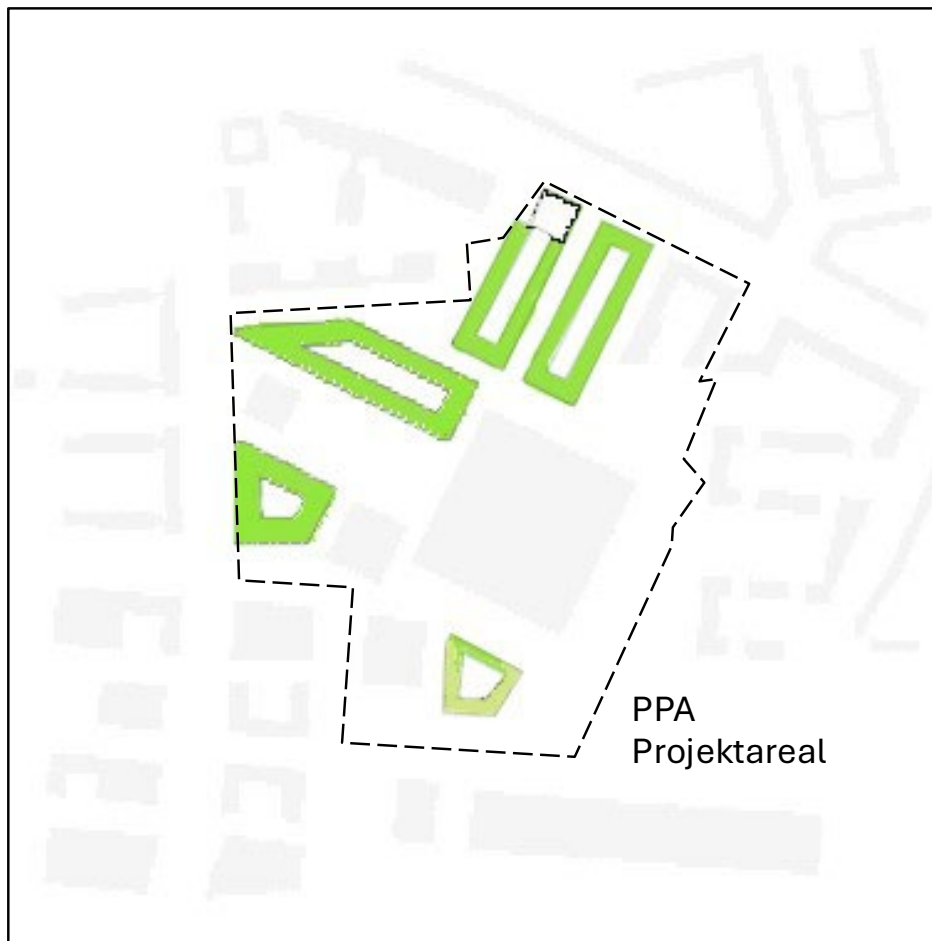


Abbildung 94: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (20. Juli - 23:00)



Potenzielle Temperatur [°C]

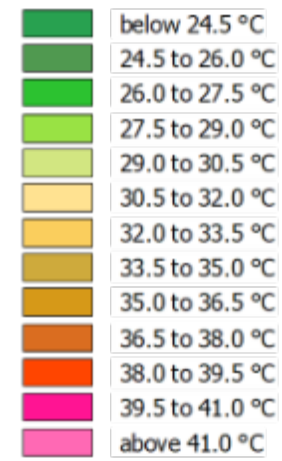


Abbildung 95: Potenzielle Temperatur auf Dächern (20. Juli - 23:00)

03:00 Uhr

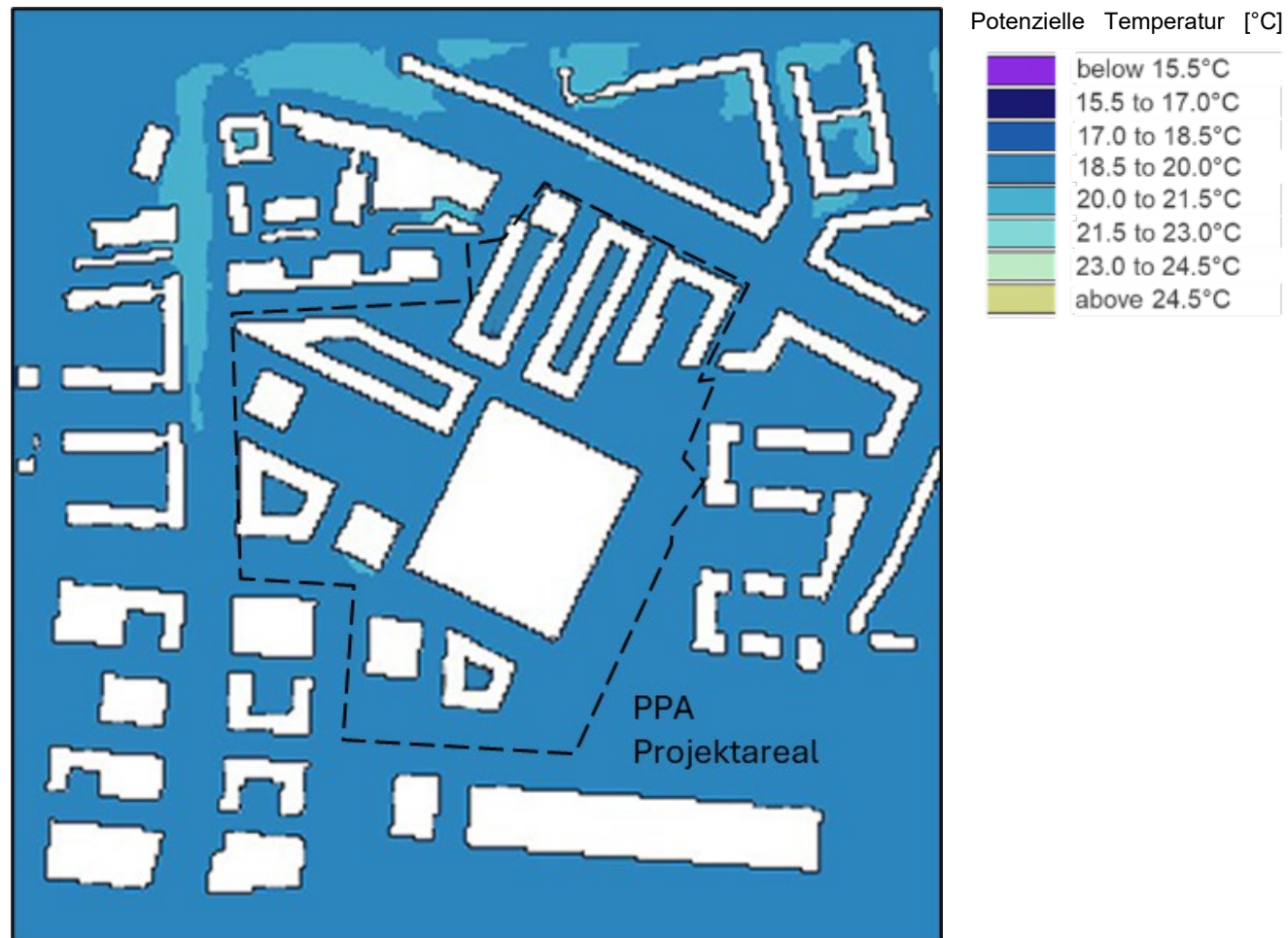


Abbildung 96: Potenzielle Temperatur in öffentlichen Räumen (21. Juli - 03:00)

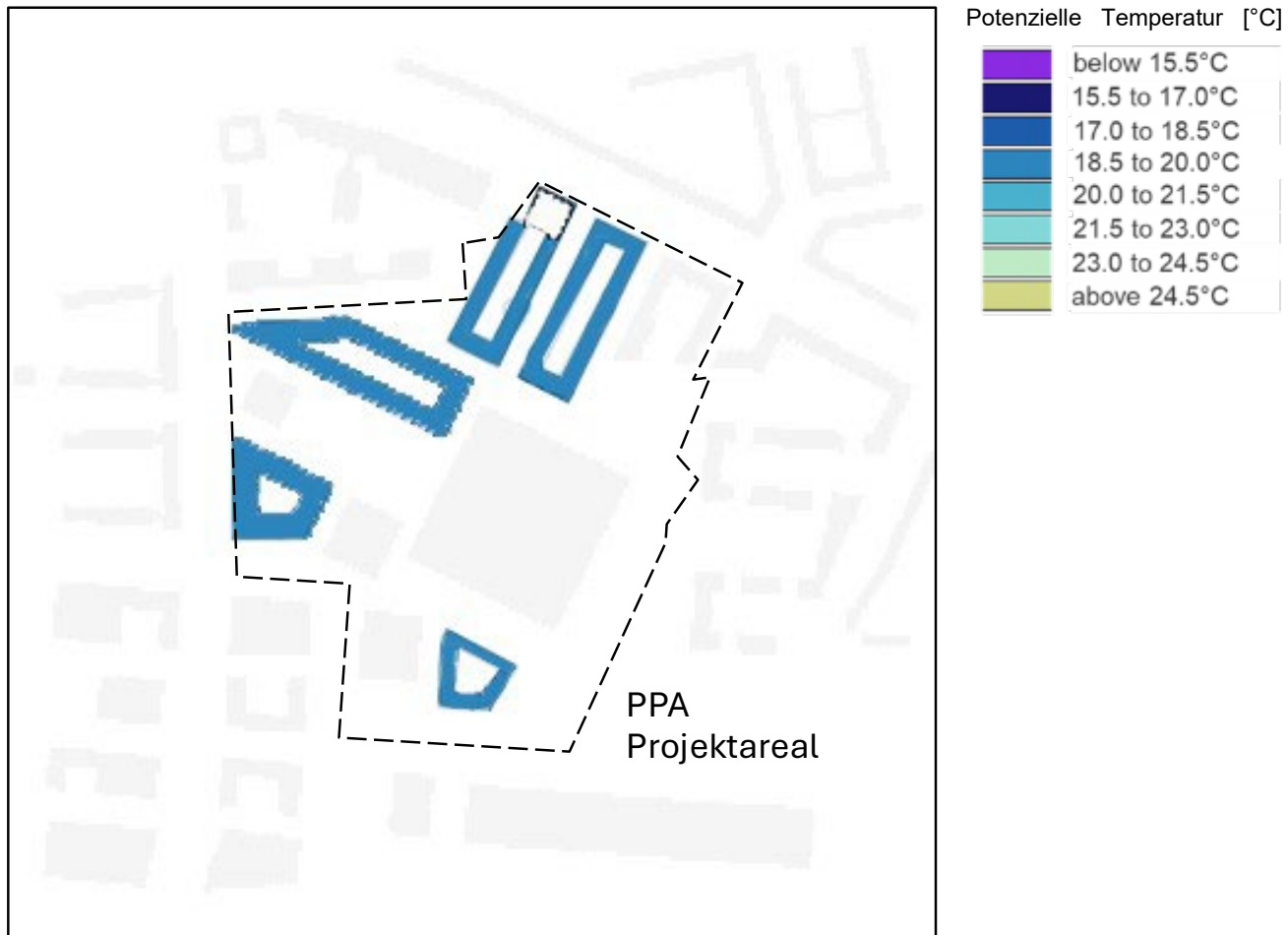


Abbildung 97: Potenzielle Temperatur auf Dächern (21. Juli - 03:00)

References

Bruse, M., 2004. *ENVI-met 3.0: Updated Model Overview*, s.l.: s.n.

Bruse, M., 2004. *ENVI-met implementation of the Jacobs A-gs Model to calculate the stomata conductance (Working paper)*, s.l.: s.n.

Bruse, M. & Fleer, H., 1998. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, Issue 13, pp. 373-384.

Calvet, J.-C. et al., 1998. An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92(2), pp. 73-95.

Choudhury, B. J. & Monteith, J. L., 1986. Implications of stomatal response to saturation deficit for the heat balance of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36(3), pp. 215-225.

Clapp, R. B. & Hornberger, G. M., 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 14(4), pp. 601-604.

ENVI-met, 2023. *ENVI-met Support Center - Underestimated? MRT (mean radiation temperature)*. [Online]
Available at: <http://www.envi-hq.com/viewtopic.php?f=3&t=5096&p=19382&hilit=ACRT&sid=01edccef7c3efae97c39a92811bcaacf#p19382>
[Accessed 25 05 2024].

ENVI-met, 2024. *ENVI-met Model Architecture*. [Online]
Available at: <https://envi-met.info/doku.php?id=intro:modelconcept>
[Accessed 25 05 2024].

ENVI-met, 2024. *ENVI-met Update History*. [Online]

Available at: <https://envi-met.info/doku.php?id=apps:updates>

[Accessed 25 05 2024].

Forouzandeh, A., 2018. Numerical modeling validation for the microclimate thermal condition of semi-closed courtyard spaces between buildings. *Sustainable Cities and Society*, Volume 36, pp. 327-345.

Goudriaan, J., van Laar, H. H., van Keulen, H. & Louwerse, W., 1985. Photosynthesis, CO₂ and Plant Production. In: W. Day & R. K. Atkin, eds. *Wheat Growth and Modelling*. s.l.:NATO Science Series A: (NSSA, volume 86), pp. 107-122.

Huttner, S., 2012. *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met*, Mainz, Germany: s.n.

Jacobs, C., 1994. *Direct Impact of Atmospheric CO₂ Enrichment on Regional Transpiration*. [Online]

Available at: <https://edepot.wur.nl/206972>

[Accessed 26 05 2024].

Launder, B. E. & Spalding, D. B., 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), pp. 269-289.

Liu, J., 1997. E- ϵ modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge.. *Boundary Layer Meteorology*, Volume 77, pp. 21-44.

Liu, J., Chen, J. M., Black, T. A. & Novak, M. D., 1996. E- ϵ modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 77, pp. 21-44.

Mennerich, I., 2016. *Wettervorhersage in der Schule (1)*. [Online]

Available at: [http://www.schulbiologiezentrum.info/AH%2019.87%20%20Wettervorhersage%20in%20der%20Schule%20\(1\).pdf](http://www.schulbiologiezentrum.info/AH%2019.87%20%20Wettervorhersage%20in%20der%20Schule%20(1).pdf)

[Accessed 25 05 2024].

Salata, F., Golasi, I., Vollaro, R. d. L. & Vollaro, A. d. L., 2016. Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society*, Volume 26, pp. 318-343.

Simon, H., 2016. *ENVI-met eLibrary - Thesis - Modeling urban microclimate. Development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met*. [Online]

Available at: https://envi-met.info/documents/thesis/phD_Simon2010.pdf

[Accessed 31 05 2024].

Simon, H. et al., 2018. Modeling transpiration and leaf temperature of urban trees - A case study evaluating the microclimate model ENVI-met against measurement data. *Landscape and Urban Planning*, Issue 174, pp. 33-40.

Simon, H., Sinsal, T. & Bruse, M., 2020. Introduction of Fractal-Based Tree Digitization and Accurate In-Canopy Radiation Transfer Modelling to the Microclimate Model ENVI-met. *Forests*, 11(869).

Simon, H., Sinsal, T. & Bruse, M., 2021. Advances in Simulating Radiative Heat Transfer in Complex Environments. *Applied Sciences*, 11(5449).

Tjernström, M., 1989. Some tests with a surface energy balance scheme, including a bulk parameterisation for vegetation, in a mesoscale model. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 48, pp. 33-68.

van Heemst, 1986. Potential crop production. In: Pudoc, ed. *Modelling of Agricultural Production: Weather, Soils and Crops*. s.l.:Wageningen.

Wanielista, M. P., Kersten, R. & Eaglin, R., 1997. *Hydrology: Water Quantity and Quality Control*. 2nd ed. s.l.:Wiley.

Wilson, J. D., 1988. A second-order closure model for flow through vegetation. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 42, pp. 371-392.

Yamada, T., 1982. A numerical model study of turbulent airflow in and above a forest canopy.. *Journal of the Meteorology Society Japan*, Volume 60, pp. 439-454.

Yamada, T. & Mellor, G., 1975. A Simulation of the Wangara Atmospheric Boundary Layer Data. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32(12), pp. 2309-2329.