

# **Bebauungsplan**

**"Einkaufsquartier südlich der Ludwigsstraße (A  
262)".**

**Mikroklimasimulation für das Einkaufsquartier Lud-  
wigsstraße und den Neubau Fuststraße**

Projektbericht erstellt für

Boulevard LU GmbH & Co. KG

Rheinstraße 194b

55218 Ingelheim am Rhein

Erstellt von:  
Univ.-Prof. Dr. Michael Bruse

ENVI\_MET GmbH  
Huysenallee 78-80  
45128 Essen  
[www.envi-met.com](http://www.envi-met.com)

Essen, Mai 2023

## Inhalt

1	Einleitung.....	3
1.1	Wirkungskomplex Stadtklima.....	3
1.2	Klimaadaptierte Stadtplanung .....	5
1.3	Bewertung durch numerische Simulation.....	5
1.4	Ziel des Projektes: Umbau des (ehem.) Karstadt Komplex in der Ludwigsstr., Mainz..	6
1.5	Szenarien .....	7
2	Simulationen mit dem Mikroklimamodell ENVI-met.....	9
2.1	Das Modell ENVI-met.....	10
2.2	Modelltechnische Umsetzung der Thematik Hitze in städtischen Räumen.....	10
3	Analyse der Modellergebnisse .....	12
3.1	Auswertung Windfeld.....	12
3.2	Auswertung Lufttemperatur.....	12
3.2.1	Lufttemperatur in 1.8 m Höhe.....	12
3.2.2	Lufttemperatur auf Dachniveau.....	13
3.2.3	Oberflächentemperaturen auf Dachniveau.....	15
3.3	Bioklimatologische Analyse.....	15
3.3.1	Funktionsweise von PET .....	16
3.3.2	Interpretation von PET .....	18
3.3.3	Die PET- Verteilung um 15:00 Uhr.....	20
4	Zusammenfassung.....	22

## 1 Einleitung

Seit der Veröffentlichung des 4. Sachstandberichts über Klimaänderungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Anfang 2007 besitzt das Thema Klima und Klimawandel einen zentralen Stellenwert in der öffentlichen und politischen Aufmerksamkeit und Diskussion. Auch wenn einzelne Aspekte des IPCC-Reports zum Teil kontrovers diskutiert werden und die Vielzahl von Daten und unterschiedlichen Annahmen leicht verwirren können – die Sorge vor den negativen lokalen Auswirkungen des globalen Klimawandels hat viele Menschen für die Wechselwirkungen zwischen dem menschlichen Handeln und den dynamischen Prozessen in der Atmosphäre sensibilisiert.

Betrachtet man die im IPCC Bericht und seinen aktuellen Fortschreibungen prognostizierten Veränderungen des Klimas, so muss man sich auf eine signifikante Zunahme der Häufigkeit, Dauer und Intensität von sommerlichen Hitzeperioden vorbereiten. Besonders Bewohner von Städten werden unter solchen Extremen leiden, wobei die sogenannte *Städtische Wärmeinsel* bereits heute dafür sorgt, dass die nächtliche Lufttemperatur in dicht bebauten Stadtteilen bis zu 5 °C über den Freilandtemperaturen liegen kann. Dieser hausgemachte Klimateffekt wird sich in Hitzeperioden zu den ohnehin hohen Lufttemperaturen hinzuaddieren. Auch tagsüber ist die thermische Belastung durch die Verwendung von Versiegelungsmaterialien und der Verringerung der Durchlüftung in städtischen Gebieten oftmals deutlich höher, als die meteorologischen Referenzwerte vermuten lassen.

Durch eine klimagerechte und klimaangepasste Stadtplanung hat der Mensch jedoch die Möglichkeit, die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf das Stadtklima zu reduzieren und das innerstädtische Mikroklima so zu beeinflussen, dass eine Überhitzung reduziert werden kann.

### 1.1 Wirkungskomplex Stadtklima

Es gibt nicht „das“ Stadtklima, sondern jede Stadt stellt einen Flickenteppich unterschiedlichster Mikroklimata („Klimatope“) dar, die auf engstem Raum nebeneinander liegen können. Vor allem im Sommer und an windschwachen Tagen prägt die lokale Gestaltung der Umwelt das Mikroklima maßgeblich und steuert somit, ob ein Ort als klimatisch angenehm oder als belastend empfunden wird.

In fast allen Fällen stellt sich aber ein für den Menschen angenehmes Mikroklima im städtischen Raum nicht von selbst ein, sodass sich in jeder Stadt zahlreiche Beispiele finden lassen, bei denen die Gestaltung des städtischen Raumes auf rein funktionellen Überlegungen basiert und klimatologische Belange nicht berücksichtigt werden. Dieser Ansatz führt nahezu zwangsläufig zu Bereichen mit einem belastenden oder zumindest unangenehmen Kleinklima.

Eine klimaadaptierte Stadtplanung auf der einen Seite sowie die funktionalen und gestalterischen Anforderungen an eine Stadt auf der anderen Seite müssen jedoch keine konkurrierenden Zielvorstellungen sein. Es lassen sich zahlreiche Beispiele von Städten finden, die in klimatisch ungünstigen Zonen der Welt liegen und in denen das Wissen um eine klimagerechte Architektur und Stadtplanung ein fester Bestandteil der Kultur und des Stadtbildes geworden sind.

Im Hinblick auf den Themenkomplex **Hitzebelastung** lassen sich in der Stadtklimatologie zwei wesentliche Problemfelder identifizieren, die typisch sind für unvorteilhafte Wechselwirkungen zwischen der Umweltgestaltung und dem Kleinklima:

Problemfeld 1 beinhaltet ungünstige Wechselwirkungen zwischen der Bebauungsstruktur und den lokalen Windverhältnissen. Hier können einerseits zu geringe Windgeschwindigkeiten, die zu einer mangelnden Durchlüftung der Struktur führen, ein potenzielles Problem erzeugen. Andererseits bergen zu hohe lokale Windgeschwindigkeiten, z.B. durch Düsenwirkungen, ebenfalls ein Risikopotential für Fußgänger, Vegetation und Gebäude.

Das zweite Problemfeld umfasst die thermische Situation in der Stadt, hervorgerufen durch die verwendeten Materialien, deren fehlende Verdunstungsmöglichkeit und das zum Teil immense Wärmespeichervermögen von Gebäuden und der Bodenoberfläche.

Durch das Fehlen von Verdunstungsmöglichkeiten kann die eintreffende Sonnenenergie an den unterschiedlichen Oberflächen wie den Fassaden oder dem Boden entweder nur im Material gespeichert oder als fühlbare „sensible“ Wärme von der Oberfläche an die Luft abgegeben werden. Die Übertragung sensibler Wärme an die Luft führt dann zwangsläufig zu einer Überwärmung der bodennahen Luftschichten.

Die Speicherung in der Gebäudesubstanz oder im Boden hingegen führt zu einem „Aufladen des Wärmeakkumulators“ während des Tages und zu einer Abgabe von sensibler Wärme und infraroter Wärmestrahlung während der Nachtstunden. Zudem wird das Gebäudeinnere mittels des Wärmestroms durch die Wand aufgeheizt, wodurch die Effekte der Außenraumgestaltung auch für das Innenraumklima relevant werden.

## 1.2 Klimaadaptierte Stadtplanung

Städte sind lebendige Strukturen, die einem ständigen Wandel unterworfen sind, so wie die aktuelle Planung im Bereich der Ludwigsstraße. An manchen Stellen verdichten sich die Stadtstrukturen, während in anderen Bereichen neue Freiräume durch Rückbau entstehen. All diese Prozesse bieten mannigfaltige Möglichkeiten, die Belange der Stadtklimatologie und des thermischen Komforts mit zu berücksichtigen.

Eine klimaadaptierte Stadtplanung ist weder eine Planung der Verhinderung oder des Rückschrittes, noch ist sie ein Widerspruch zu ökonomischen und funktionellen Interessen: Eine Stadtstruktur, die sicherstellt, dass sie ihren Bürgern auch unter Extrembedingungen wie sommerlichen Hitzeperioden eine angenehme Lebensqualität in den Außenbereichen bietet, wird zukünftig Wettbewerbsvorteile gegenüber jenen Städten haben, die dieses nicht leisten. Im Gegensatz zu vielen Prognosen des Klimawandels ist die demographische Perspektive in fast allen europäischen Ländern bekannt: Die Bevölkerung schrumpft und wird älter. Dieses bringt veränderte Herausforderungen an die Städte mit sich, da beispielsweise durch das höhere Alter die gesundheitliche Sensibilität der Bevölkerung gegenüber Hitzeperioden zunimmt während gleichzeitig deren Mobilität - und damit die Option ungünstige Situationen zu verlassen - abnimmt. Da mittelfristig mit einem Überangebot an Wohn- und Lebensraum in Städten zu rechnen ist, wird die Konkurrenz der Städte um Bürger weiter zunehmen, und ein angenehmes Mikroklima mit Schutz vor Extremwetterlagen wird dabei ein wesentlicher Standortfaktor werden.

## 1.3 Bewertung durch numerische Simulation

Die klimaorientierte Stadtplanung von heute benötigt Informationen darüber, wie sich das System Stadt unter den zu erwartenden Klimabedingungen verhalten wird. Das Mikroklima einer Stadt ist aber ebenso komplex wie das Klima der Erde oder die Wettervorhersage. Es

gibt keine einfache Regel, um wie viel Grad ein Park die Lufttemperatur senkt oder ob das Schließen einer Baulücke eine wesentliche Veränderung des Mikroklimas verursachen wird. Den einzigen sinnvollen Weg zur Bewertung von Planungsszenarien bieten daher numerische Simulationen, die quasi einen „Wetterbericht“ für einen Stadtteil oder ein Quartier erstellen können. Mit Hilfe von Modellsimulationen lässt sich die Struktur der Stadt beliebig verändern, ohne dass ein einziges Haus in der Wirklichkeit abgerissen oder gebaut werden müsste. So lassen sich die verschiedensten Planungsszenarien „durchspielen“ und die beste Option kann ausgewählt werden.

Zur numerischen Bewertung von kleinskaligen klimatologischen Prozessen hat sich das Rechenmodell ENVI-met ([www.envi-met.com](http://www.envi-met.com)) weltweit bewährt. Mit ENVI-met ist es möglich bei einer räumlichen Auflösung von üblicherweise 1 bis 5 Meter die Stadtstruktur mit den unterschiedlichen Objekten und Materialien detailliert nachzubauen und das hieraus resultierende Mikroklima zu simulieren.

#### **1.4 Ziel des Projektes: Umbau des (ehem.) Karstadt Komplex in der Ludwigsstr., Mainz**

Im Rahmen dieser Untersuchung wird gezeigt, wie sich der Neubau des KARSTADT-Komplexes mit verschiedenen Fassaden- und Dachbegrünungen auf das lokale Mikroklima und den thermischen Komfort auswirken.

Kernbereich dieser Untersuchung entspricht dem Geltungsbereich des Bebauungsplans „A 262“, wobei aus modelltechnischen Gründen ein etwas größerer Ausschnitt der Umgebung betrachtet werden muss, um für den eigentlichen Kernbereich realistische Randbedingungen zu erzeugen.

Die Baumaßnahme beinhaltet im ersten Schritt den Rückbau des bestehenden Karstadt-Gebäudes sowie der drei angrenzenden Pavillons an der Ludwigstraße. Diese Bebauungssituation vor diesem Rückbau wird in den nachfolgenden Szenarien als Status-Quo bezeichnet und dient als Referenzzustand für die Simulationen.

Anstelle des Karstadt-Gebäudes ist die Errichtung eines neuen Einkaufsquartiers geplant, dass unter anderem aus einer Markthalle über drei Verkaufsgeschosse, Einzelhandelseinheiten sowie einem Hotel besteht. Auf den Dachterrassen sind öffentlich zugängliche (gastronomische)

Nutzungen geplant, wodurch das Mikroklima in diesem Bereich in diesem Gutachten ebenfalls betrachtet wird.

Neben der Neuentwicklung des Karstadt-Gebäudes ist ebenfalls die Entwicklung des ehemaligen Karstadt-Sport-Gebäudes in der Fuststraße zusammen mit dem Grundbesitz am Bischofsplatz zu einem Wohn- und Geschäftshaus geplant. Die Verbindungsbrücke zwischen Fuststraße 2 sowie Bischofsplatz 12 wird hierbei entfernt. Diese bauliche Veränderung ist in den Planungsszenarien der Simulation ebenfalls berücksichtigt.

## 1.5 Szenarien

Es wurden drei Szenarien modelliert, deren Simulationsergebnisse in der Folge miteinander verglichen werden. Um Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden alle drei Modellgebiete mit den exakt gleichen Dimensionen und Auflösungen erstellt (siehe Übersichtsabbildung A und die A4 Abbildungstafeln 1a bis 1c im Anhang). Außerhalb des Kern-Planungsgebietes wurden Gebäudestrukturen, Oberflächenmaterialien und Vegetation auf Basis des derzeitigen Bestands für alle drei Szenarien identisch modelliert.

Die Modellerstellung basiert auf dem Begrünungskonzept für die Dach- und Fassadenflächen nach den Ausführungen des Büros Faerber Architekten. Die entsprechenden Planungsunterlagen sind in Ergänzung im Anhang wiedergegeben.

Um Unterschiede der Planungen zum vorherigen Bestand aufzeigen zu können, repräsentiert das Szenario **Status-Quo (vgl. Abbildungs-Tafel 1a)** eine Modellierung des Alt/Ist-Zustands.

Die grau gefärbten Gebäudestrukturen weisen auf die Verwendung von Standard-Materialien aus Beton mit Isolierungsschichten und Putz hin. Die grüne Farbe an der Süd-Ost-Fassade des Bestandsgebäudes zeigt die digitalisierte Begrünung durch Efeu auf. Die komplexeren grünen Strukturen repräsentieren Bäume, graue Bodenflächen Fußwege, schwarze Bodenflächen Straßen, braune Bodenflächen offene bzw. begrünte Oberflächen.

Für die beiden **Planungsszenarien** gelten die gleichen Farb-Kodierungen. Zusätzlich lassen sich jedoch auch die modellierten Glass-Fassaden in hellblau sowie die Photovoltaik-Anlagen

auf dem Dach des Neubaus in schwarz/dunkelgrün erkennen. Die Kubaturen der neu geplanten Gebäude wurden entsprechend angepasst und sind identisch für beide Planungsszenarien. Auch die geplanten Baumpflanzungen in der Weißliliengasse sowie Dimensionen und Verortungen von Dachbegrünungen und Photovoltaik-Anlagen wurden für beide Szenarien gleich modelliert.

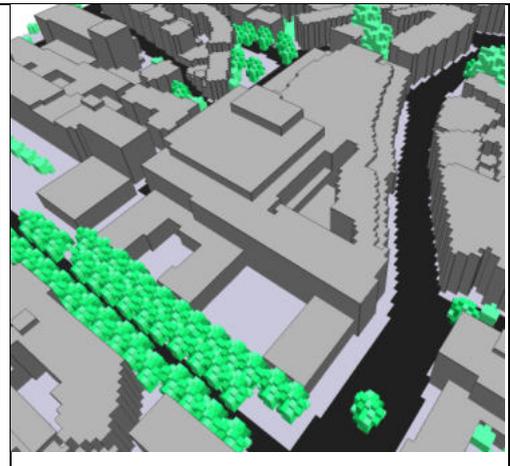
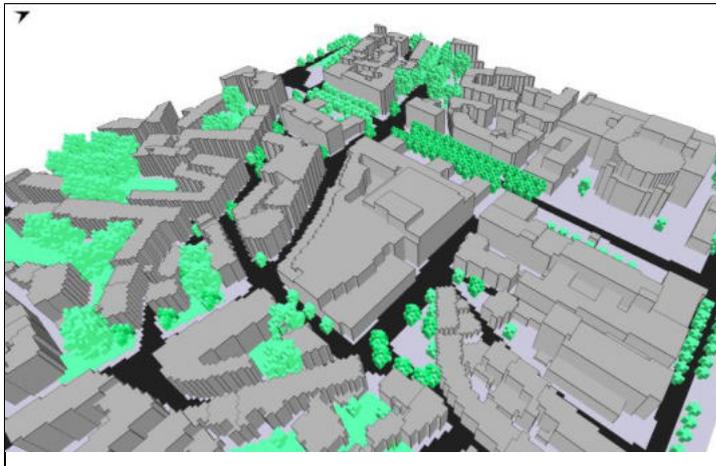
Die Dichte der Dach- und Fassadenbegrünung ist in den Abbildungen als Leaf Area Index/Blattflächenindex (LAI) in  $\text{m}^3$  Blattvolumen pro  $\text{m}^3$  Luftvolumen angegeben.

Die Planung **Extensiv (vgl. Abbildungs-Tafel 1b)** beschreibt dabei die Umsetzung aller geforderten Planungs-Maßnahmen in Bezug auf Begrünung und Photovoltaik-Anlagen an allen zur Verfügung stehenden Wand- und Dachflächen.

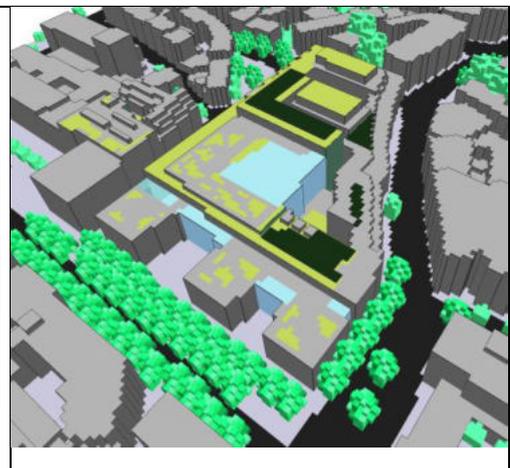
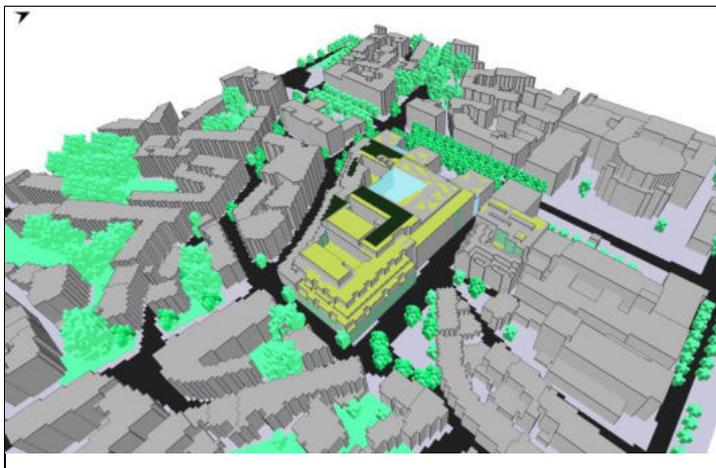
Die Planung **Ideal (vgl. Abbildungs-Tafel 1c)** stellt hingegen die aktuell tatsächliche Planung dar, welche die geforderten Maßnahmen durch zusätzliche intensive Dachbegrünung übertrifft. Da die intensive Begrünung in der tatsächlichen Planung Maximal nicht nur kleinere Sträucher, sondern auch größere Pflanzungen bis hin zu kleineren Bäumen vorsieht, wurden diese zusätzlich auf den dafür vorgesehenen Dachflächen hinzugefügt, um einen entsprechend größeren Schattenwurf im Modell zu berücksichtigen.

**Gesamtes Modellgebiet (Blick nach NW)**

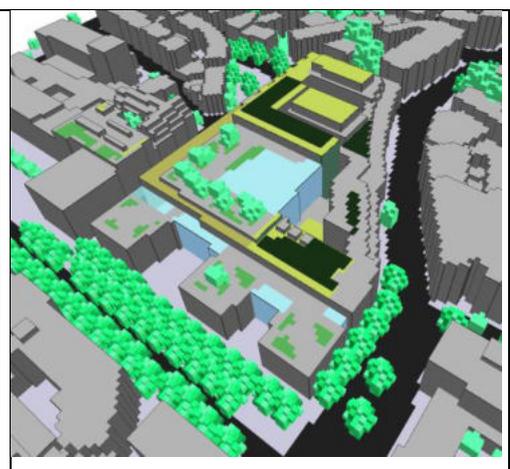
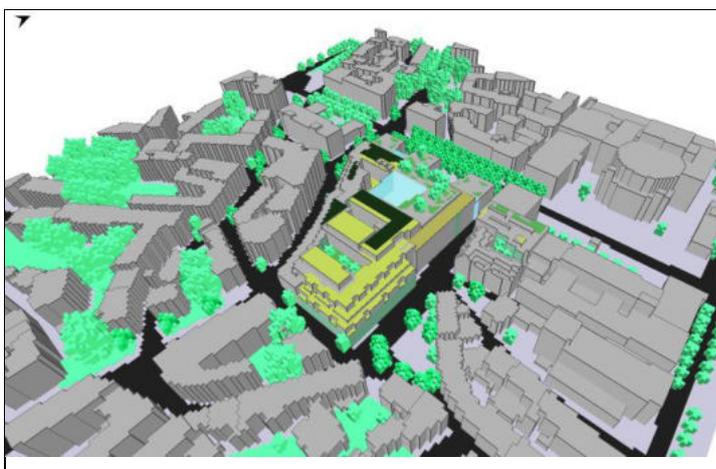
**Planungsgebiet im Detail**



Zustand Alt/Ist



Planung Extensiv



Planung Ideal

**Abbildung A: Übersicht der Planungsvarianten**

## 2 Simulationen mit dem Mikroklimamodell ENVI-met

### 2.1 Das Modell ENVI-met

Das Modell ENVI-met (siehe [www.envi-met.com](http://www.envi-met.com)) ist ein dreidimensionales, nicht-stationäres Strömungs-Energiebilanzmodell zur Berechnung des Mikroklimas und der Luftschadstoffverteilung in komplexen Umweltsituationen, wie beispielsweise dem städtischen Umfeld. Die physikalischen Grundlagen des Modells basieren auf den Gesetzen der Strömungsmechanik (nicht-hydrostatische Navier-Stokes Gleichungen), der Thermodynamik (Energiebilanz von Oberflächen sowie Energieerhaltung in der Atmosphäre) sowie weiteren spezifischen Teilmodulen wie z.B. des Strahlungstransfers, der Gebäudephysik oder der Biodynamik von Pflanzen.

### 2.2 Modelltechnische Umsetzung der Thematik Hitze in städtischen Räumen

Ziel dieser Untersuchung ist die Analyse der kleinskaligen mikroklimatologischen Verhältnisse im Bereich des Neubaus an der Ludwigsstraße in Mainz.

Hierbei wird die Situation eines durchschnittlich heißen Sommertages in Mainz (5. Juli), wie er unter zukünftigen Klimaverhältnissen wahrscheinlich häufiger vorkommen wird, angenommen. Die in der Simulation dargestellten Prozesse lassen sich jedoch auch ohne Weiteres auf heissere Tage übertragen, soweit sicher gestellt wird, dass die Dachbegrünung ausreichend Wasser zur Verfügung hat.

Der Antrieb für das kleinskalige Modell ENVI-met erfolgt durch einen vorgegebenen Tagesgang der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte in 2 m Höhe (vgl. Abbildung B).

Zusammenfassung der meteorologischen Rahmenbedingungen:

- Datum: 5. Juli
- Bewölkung: keine
- Windgeschwindigkeit und -richtung: 1.8 m/s aus West in 10 m über flachem Gelände
- Lufttemperatur: Maximum 30 °C um 16:00 Uhr, Minimum 18 °C um 06:00 Uhr in 2 m Höhe
- Relative Luftfeuchte: Maximum 70% um 06:00 Uhr, Minimum 50% um 16:00 Uhr in 2m Höhe

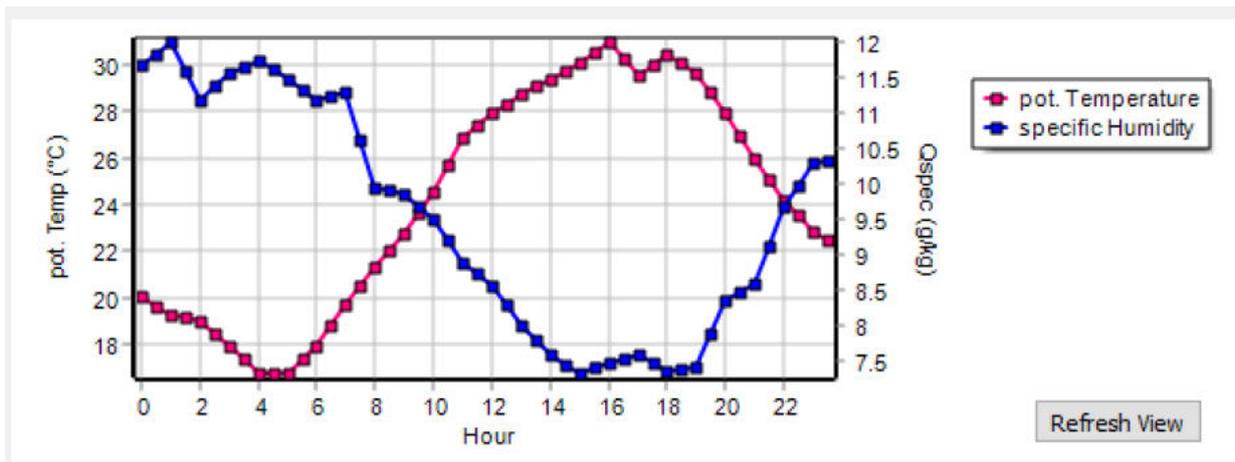


Abbildung B: Verlauf der Lufttemperatur und der relativen Feuchte in 2 m Höhe als Modellantrieb für den 5. Juli eines Jahres

## 3 Analyse der Modellergebnisse

### 3.1 Auswertung Windfeld

Die Abbildungstafeln 2a und 2b zeigen das bodennahe Windfeld im Simulationsgebiet als Pfeilgrafik, wobei die Einfärbung der individuellen Pfeile die Windgeschwindigkeit visualisiert.

Da die Begrünungsvarianten auf Dachniveau keine oder nur minimale Auswirkungen auf das bodennahe Windfeld haben, wurde nur das Windfeld für die Planung „Ideal“ dargestellt.

Generell ist aufgrund der dichten Bebauung des Untersuchungsgebiets die Windgeschwindigkeit stark reduziert mit einzelnen Düseneffekten in den westlichen Bereichen der Gebäudestrukturen. Abbildungstafel 2c zeigt die Veränderungen in der Windgeschwindigkeit im direkten Vergleich zwischen dem Bestand und der Planung „Ideal“. Negative Werte (blau) stehen hierbei für Bereiche, in denen bei der Planungsvariante mit geringeren Windgeschwindigkeiten zu rechnen ist. Positive Werte zeigen Bereiche mit einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit an.

Generell zeigen sich nur geringe Veränderungen im Windfeld, die keine weitere Interpretationen nötig machen. Lediglich im südlichen Bereich des Gutenbergplatzes kommt es durch die Veränderung der Gebäudekubaturen zu einer Verringerung der Windgeschwindigkeit um ca. 0.4 m/s. In diesem Bereich, könnte über ergänzende Verschattungsmaßnahmen nachgedacht werden. Allerdings tritt dieser Effekt auch nur bei einer genau westlichen Anströmung des Untersuchungsgebiets auf. Bei anderen Windrichtungen aus mehr nördlichen oder östlichen Sektoren ist dieser Effekt weniger oder gar nicht zu beobachten.

### 3.2 Auswertung Lufttemperatur

#### 3.2.1 Lufttemperatur in 1.8 m Höhe

Die Abbildungstafeln 3a bis 3c stellen die Verteilung der Lufttemperatur in 1.8 m Höhe um 15:00 Uhr in absoluten Werten dar. Die Abbildungen 3d und 3e zeigen jeweils das Differenzbild im Vergleich zur SQ Situation, wobei negative Werte einen Abkühlungseffekt abbilden.

Abbildung 3a zeigt die Verteilung der Lufttemperatur für den Status-Quo Fall. Die Temperaturspanne zwischen den wärmsten und kältesten Bereichen beträgt ca. 4 K, wobei der Einströmrand auf der linken Seite nicht mit interpretiert werden sollte. Insbesondere der Baumbestand in der Ludwigstraße macht sich lokal in reduzierten Lufttemperaturen deutlich bemerkbar.

Zur Interpretation der Auswirkungen der Planung auf die Lufttemperaturen sind vor allem die Differenzkarten 3d und 3e hilfreich, da hier Abkühlungs- und Erwärmungseffekte direkt abgelesen werden können. Bereiche mit negativen Werten weisen hierbei Zonen aus, die in der Neuplanung kühler sind als im Bestand, während positive Werte eine lokale Erwärmung anzeigen.

Deutlich erkennbar ist der Effekt der Baumneupflanzungen im Bereich der Weißlilien-gasse: Da hier die neuen Bäume eine süd-west exponierte Fassade beschatten, wirken sich diese nicht nur über reduzierte Bodenoberflächentemperaturen kühlend aus, sondern verstärken durch die Fassadenabschattung diesen Trend weiter.

Im Fall der extensiven Dachbegrünung (Abbildung 3d) lässt sich eine Reduzierung der Lufttemperaturen auf dem Fußgängerniveau im Lee des Neubaukomplexes in der Größenordnung von ca. -0.3 K beobachten. Durch die Veränderungen der Baustruktur gibt es jedoch im Bereich der Ludwigstraße im Übergang zum Gutenbergplatz auch Bereiche, die bei der extensiven Dachbegrünung leicht wärmer sind als im Bestandsfall (unter +0.1 K).

Betrachtet man die Temperaturverteilung für das ideale Szenario (Abbildung 3e), so erkennt man einen etwas intensiveren Abkühlungseffekt im Lee des Gebäudes. Zudem wird der oben angesprochene leichte Erwärmungseffekt in den Gebäudeeinbuchtungen an der Ludwigstraße nunmehr quasi vollständig kompensiert.

### 3.2.2 Lufttemperatur auf Dachniveau

Die Abbildungstafeln 4a bis 4c sowie 5a und 5b verdeutlichen die Temperaturdynamik durch die Dachbegrünung durch einen Horizontalschnitt in 23 m Höhe (Abbildungen 4) sowie einen Vertikalschnitt durch das Modell (Abbildungen 5). Die Logik der Farbdarstellungen ist hier analog zu den vorherigen Karten. Abbildung D zeigt die Lage des Vertikalschnitts durch das Modellgebiet.

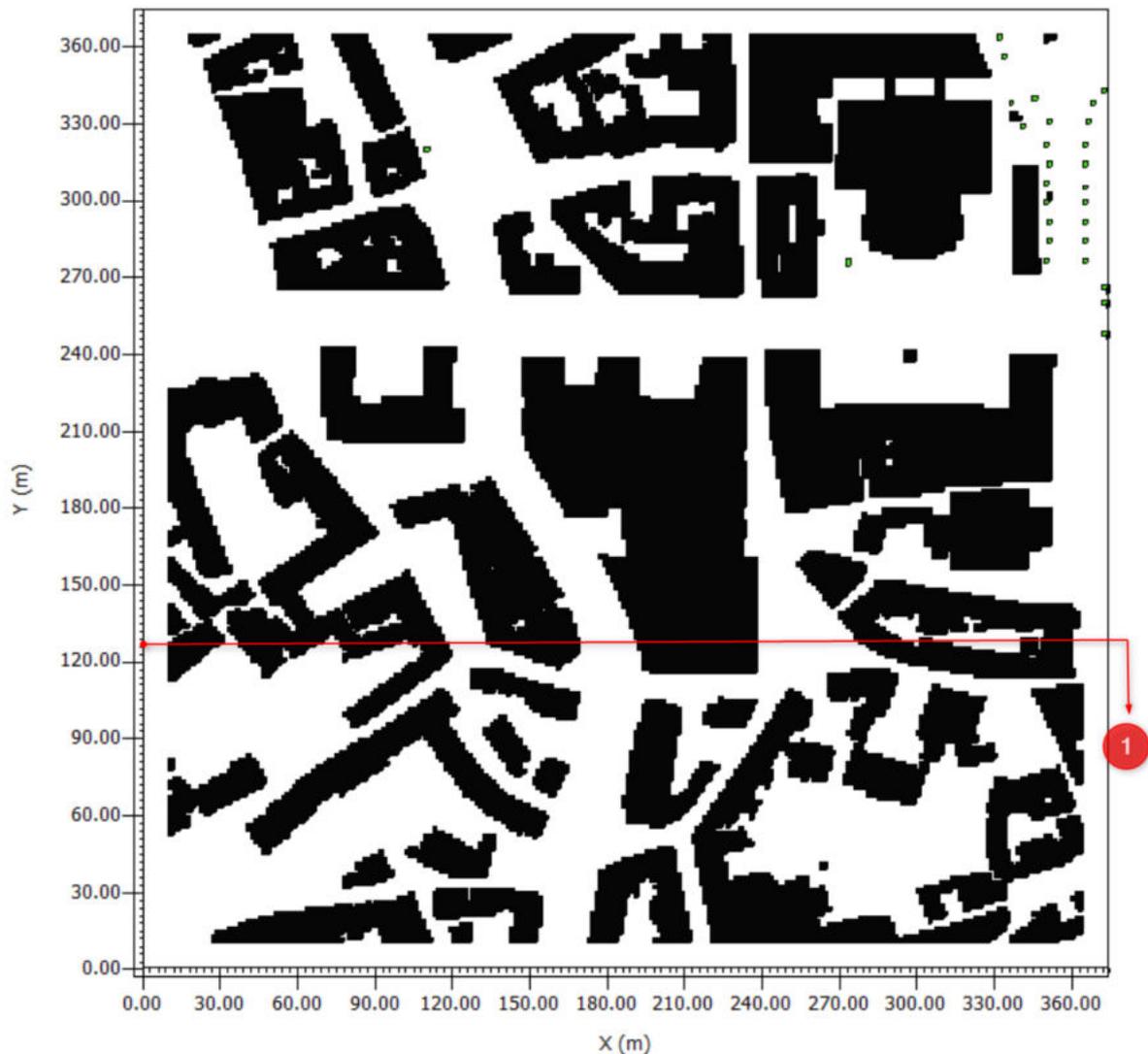


Abbildung C: Position des Vertikalschnitts für Abbildungen 4

Die Verteilung der Lufttemperatur auf dem Dachniveau (vgl. Abbildung 4a) ist komplex und hängt aufgrund der relativ hohen Windgeschwindigkeiten in dieser Höhe deutlich weniger von den lokalen Materialien und Begrünungen ab als auf dem Fußgängerniveau. Vielmehr kommt in dieser Höhe den vertikalen Luftbewegungen eine deutlich größere Rolle bei der Temperaturverteilung zu: Aufwärts gerichtete Luftströmungen z.B. durch die Überströmung von Gebäuden transportieren Luft aus den bodennahen Luftschichten in höhere Bereiche. Da während der Tagesstunden die bodennahen Luftschichten deutlich wärmer sind als höherliegende Luftschichten resultiert dieses in einer lokalen Erwärmung der höheren Luftbereiche.

Umgekehrt mischen abwärts gerichtete Luftströmungen kühlere Luft aus der Höhe lokal ein, was sich in Abkühlungsprozessen bemerkbar macht.

Generell lässt sich der Effekt der Dachbegrünung auf die lokale Lufttemperatur in den Abbildungen 4b und 4c deutlich erkennen, wobei die ideale Planung eine etwas größere Kühlwirkung aufweist.

Die Abbildungen 5a und 5b veranschaulichen diesen Effekt nochmals im X-Z Querschnitt durch die Planung. Die Kontourlinien sind hierbei im Abstand von 0.1 K eingezeichnet und stellen nur Bereiche mit Abkühlungseffekten dar. Die Position des Vertikalschnitts wurde exemplarisch gewählt und steht stellvertretend für andere Schnittpositionen im Modell, an denen sich die gleichen Effekte beobachten lassen.

Auch wenn die Dachbegrünung sich primär am Ort ihrer Installation auswirkt, so lässt sich dennoch erkennen, dass durch den Transport der Luft und nachfolgendes Durchmischen der Luftschichten, insbesondere im Fall der idealen Planung, auch eine leichte Temperaturreduktion in der Höhe des Fußgängerniveaus zu beobachten ist. Größere Bereiche mit Dachbegrünungen auch auf anderen Gebäuden würden diesen Effekt erhöhen.

### 3.2.3 Oberflächentemperaturen auf Dachniveau

Die Abbildungen 6a bis 6c illustrieren die Auswirkungen der Dachbegrünung auf die Oberflächentemperaturen der Dachoberflächen. Im unbegrünten Fall erreichen die Dachflächen Oberflächentemperaturen bis 64°C während die Dachbegrünung diese auf Werte um 28°C reduziert. Die Unterschiede zwischen der extensiven Begrünung und der intensiven Begrünung sind qualitativ minimal, die beiden Szenarien unterscheiden sich im Wesentlichen durch die räumliche Anordnung der begrünten bzw. beschatteten Dachflächen.

## 3.3 Bioklimatologische Analyse

Das Ziel einer bioklimatologischen Analyse ist es, das Zusammenwirken der verschiedenen klimatologischen Parameter (Sonnenstrahlung, Lufttemperatur, Wind, Feuchte) auf den menschlichen Organismus und das daraus resultierende thermische Empfinden zu quantifizieren. Dieser Prozess ist allerdings komplex, da einerseits die unterschiedlichen Klimapara-

meter gleichzeitig auf den Menschen einwirken und sich verstärken oder neutralisieren. Andererseits lässt die rein physikalische Bewertung von Energieflüssen nur bedingt Rückschlüsse auf die daraus resultierende thermische Wahrnehmung des Menschen zu.

In der Humanklimatologie oder Bioklimatologie wird deshalb versucht, die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Prozessen an der Schnittstelle Mensch-Umwelt und dem subjektiven Wohlbefinden zu parametrisieren. Hierzu sind in der Vergangenheit verschiedene Indikatoren entwickelt worden, mit deren Hilfe eine Bewertung des Mikroklimas vereinfacht werden soll (vgl. z.B. VDI 3787).

Wenngleich fast alle komplexeren Methoden auf dem gleichen Grundschema basieren, nämlich der Berechnung der Energiebilanz des Menschen, ausgedrückt durch seine Hauttemperatur und Körperkerntemperatur, so gibt es dennoch eine ganze Reihe miteinander konkurrierender Parameter. Die Diskussion, welcher Indikator am besten geeignet ist für eine bioklimatologische Analyse wird oft kontrovers geführt, obwohl bei objektiver Betrachtung die berechneten Ergebnisse zwar in ihrer Einheit differieren, aber nur wenig in ihrem Aussagegehalt.

Für diese Untersuchung wurde der Parameter **PET** („Physiologische Äquivalenttemperatur“) für die Bewertung verwendet (vgl. VDI 3787). PET ist bei der Bewertung des Außenklimas nicht nur der weltweit am häufigsten eingesetzten Indikator, er ist zudem sehr transparent und physikalisch analog zu den etablierten Verfahren zur Bestimmung der Energiebilanz des Menschen in Innenräumen.

Generell ist PET definiert als die Lufttemperatur eines (theoretischen) typischen Innenraums, die zu der gleichen stationären Haut- und Kerntemperatur führen würde, wie die betrachtete Außensituation.

### 3.3.1 Funktionsweise von PET

PET ist ein statischer bioklimatologischer Indikator für das Temperaturempfinden des Menschen. „Statisch“ bedeutet hierbei, dass angenommen wird, dass sich der Organismus des Menschen in einem stationären energetischen Gleichgewichtszustand hinsichtlich der Kernparameter Hauttemperatur, Kerntemperatur und Schweißrate befindet.

Bis sich ein solcher stationärer Endzustand einstellt, können 5 bis 20 Minuten vergehen, je nachdem wie stark die Ausgangsverfassung des jeweiligen Menschen und das Mikroklima, dem er ausgesetzt ist, differiert. PET ist somit vor allem geeignet, um das thermische Empfinden von Menschen zu bewerten, die eine gewisse Zeit an einem Ort verweilen.

In diesem Projekt wurde die Implementierung von PET im Simulationsmodell ENVI-met BIO-met verwendet, die gegenüber der Originalversion nach Höpfe (1999) aus VDI 3787 einige Fehlerkorrekturen aufweist. BIO-met ermöglicht die Berechnung unterschiedlicher thermischer Komfortmaße auf der Basis von durchgeführten ENVI-met Simulationen.

Zur Bestimmung von PET wird zunächst die Energiebilanzgleichung des Menschen für die Außensituation gelöst. Als Ergebnis erhält man als relevante Kennwerte für den thermischen Zustand des Menschen unter anderem

- die mittlere Hauttemperatur
- die Körperkerntemperatur
- die aktuelle Schweißrate

Die zu bewertende Außensituation wird über die Parameter

- Windgeschwindigkeit
- Lufttemperatur
- Luftfeuchte
- Strahlungstemperatur

definiert.

Die **Strahlungstemperatur** ist eine theoretische Temperatur, die den Einfluss von Sonnenstrahlung und Wärmestrahlung auf das thermische Empfinden des Menschen parametrisiert. Zur Tageszeit ist die Strahlungstemperatur der wichtigste Parameter bei der Bestimmung von PET, alle anderen Faktoren treten weit in den Hintergrund.

Der Mensch selbst wird durch seine Köpereigenschaften, sein **Geschlecht**, seine **Aktivität** sowie seine **Bekleidung** definiert. Letztere wird über den clo-Wert parametrisiert, der einem thermischen Widerstandswert entspricht. Für die Simulationen in diesem Projekt wurde von

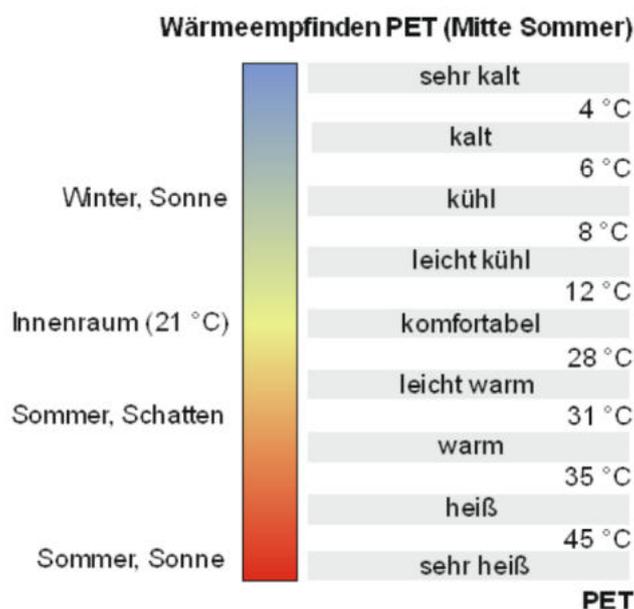
einer leichten Sommerbekleidung ( $clo = 0.5$ ) ausgegangen. Die übrigen Einstellungen entsprechen den Standardannahmen nach VDI 3787 bzw. ISO 7730.

Nachdem der thermische Zustand des Modellmenschens für die Außensituation bestimmt ist, wird der so definierte Mensch in eine standardisierte Innenraumsituation mit  $0.1 \text{ m/s}$  Wind und ohne Sonnenstrahlung übertragen. In einem nächsten Rechenprozess wird nun jene Innenraumtemperatur iterativ gesucht, bei der sich die gleiche Hauttemperatur und Kerntemperatur einstellen würde, wie sie für den Außenbereich bestimmt wurde. Das Ergebnis dieses iterativen Verfahrens - die theoretische Innenraumtemperatur - ist der PET-Wert.

### 3.3.2 Interpretation von PET

Der PET-Wert ist, wie viele andere Indikatoren (z.B. *UTCI*, *Gefühlte Temperatur*), der Versuch, eine komplexe Außenraumbedingung in eine verständlichere Innenraumsituation zu transferieren.

Die nachfolgende Abbildung D „Wärmeempfinden in der PET Skala“ veranschaulicht eine mögliche Klassifizierung von PET und dem Wärmeempfinden des Menschen.



**Abbildung D: Wärmeempfinden in der PET-Skala**

Die hier eingetragenen PET-Grenzwerte sind jedoch nur als Orientierung zu verstehen. Sie variieren über die Sommersaison und sie unterscheiden sich regional. Zudem ist die PET Skala nach oben und unten offen und kann durch weitere Attribute wie *extrem heiß* oder *extrem kalt* frei erweitert werden. Wie bei allen Modellergebnissen ist vor allem die räumliche Verteilung der Werte und deren Veränderungen durch Planungsmaßnahmen relevanter als der exakte numerische Wert von PET.

### 3.3.3 Die PET- Verteilung um 15:00 Uhr

Die Abbildungen 7a bis 7c zeigen die absolute Verteilung des PET-Wertes um 15 Uhr in 1.8 m Höhe während analog zu der Darstellung der Lufttemperatur die Abbildungen 7d und 7e die Differenz des PET im Vergleich zum Status-Quo abbilden.

Der Wertebereich der PET spannt sich für alle Bebauungsszenarien über einen Bereich von etwa 25° C im Schatten unter Bäumen bis 39° C in der Sonne auf. Hierbei finden sich die kühlfsten Stellen im Bereich der durch die Baumkronen verursachten Halb- und Vollschaten. Besonders heiÙe Bereiche sind an den Stellen zu finden, an denen die Sonnenstrahlung ungehindert das Bodenniveau erreicht und gegebenenfalls durch Reflektionen an den Fassaden verstärkt werden. Kommen in diesen Bereichen noch geringe Windgeschwindigkeiten hinzu erreicht die PET heiÙe Bereiche von über 38°C.

Der Baumbestand der Ludwigsstraße macht sich in allen Szenarien als deutliche Temperatursenke bemerkbar. Auch die schon bei der Betrachtung der Lufttemperatur diskutierten Baumpflanzungen in der Weißliliegasse reduzieren die PET in diesem Bereich um über – 7 K auf 25 bis 28° C (komfortabel).

Die Differenzkarten (Abbildungen 7d und 7e) zeigen die Unterschiede in der PET nochmal als absolute Differenzen.

Vergleicht man die beiden Szenarien „extensive Begrünung“ und „ideale Begrünung“ untereinander, so zeigen sich in der PET-Verteilung auf Fußgängerndiveau nur geringste Unterschiede. Es wurde bei der Betrachtung der Lufttemperatur zwar gezeigt, dass durch vertikale Luftbewegungen thermische Verbesserungen im Dachniveau durchaus bis auf das 2 m Niveau hinuntertransportiert werden können. Allerdings bezieht die PET als biometeorologischer Indikator tagsüber vor allem auf den Einfluss der Sonnenstrahlung bzw. auf das Wärmeempfinden, und, mit deutlich schwächerem Einfluss, auf den Effekt der Windgeschwindigkeit. Diese beiden Faktoren werden durch die Dachbegrünung nicht beeinflusst, sodass sich der beobachtete Effekt auf die Lufttemperatur nicht in der PET-Verteilung ablesen lässt.

## 4 Zusammenfassung

Für das Neubauvorhaben an der Ludwigstraße in Mainz wurden die Auswirkungen von insgesamt drei unterschiedliche Gestaltungssituationen (Status-Quo sowie zwei Planungsvarianten) auf das lokale Mikroklima mittels numerischer Simulation untersucht.

Die beiden Planungsvarianten unterscheiden sich in Art und Umfang der geplanten Dachbegrünung: die Planungsvariante „Extensive“ sieht eine extensive Dachbegrünung nach gültigen Vorschriften sowie das Anbringen von Solarpanelen vor, während die Planung „Ideal“ darüber hinausgeht und eine intensive Dachbegrünung mit Bäumen und Sträuchern plant.

Zusätzlich sind in beiden Planungsszenarien Baumneupflanzungen im Bereich der Weißlilien-gasse vorgesehen.

Die Planungsszenarien wurden für einen heißen Sommertag mit Westwinden numerisch untersucht und in Relation zum Status-Quo (Bestandsgebäude ohne Dachbegrünung) gesetzt.

Durch die Baumpflanzungen konnten deutliche Reduzierungen sowohl der absoluten Lufttemperatur als auch der gefühlten Temperatur (PET) im Straßenraum erzielt werden.

Wenngleich die Dachbegrünung auf einer Höhe von +23 m und mehr über dem Fußgänger-niveau liegt, konnte dennoch ein leichter Effekt auf die bodennahen Lufttemperaturen festgestellt werden. Dieser betrug ca. 0.25 bis 0.30 K im Falle der extensiven Begrünung und bis zu 0.4 K im Falle der idealen Planung, wobei im letzteren Fall nicht nur die Intensität der Abkühlung etwas höher ist, sondern sich auch der Wirkungsbereich deutlich weiter erstreckt.

Essen, 10. Mai 2023



Prof. Dr. Michael Bruse

## 5 Anhang: Grünkonzept

Grünkonzept basierend auf den Dach- und Fassadenbegrünungsbilanzen von

Faerber Architekten

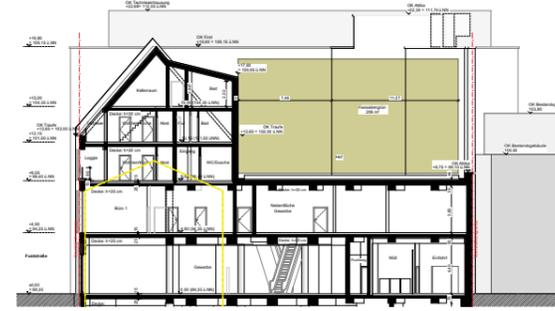
Große Weißgasse 11

55116 Mainz

Stand: 21.04.2023 / 17.04.2023



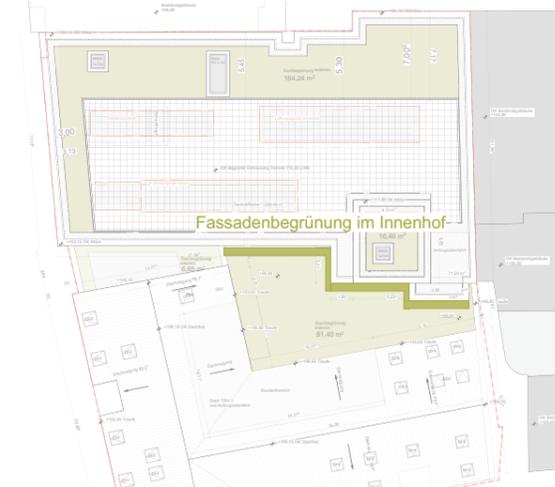
Ansicht Nord Ludwigsstraße



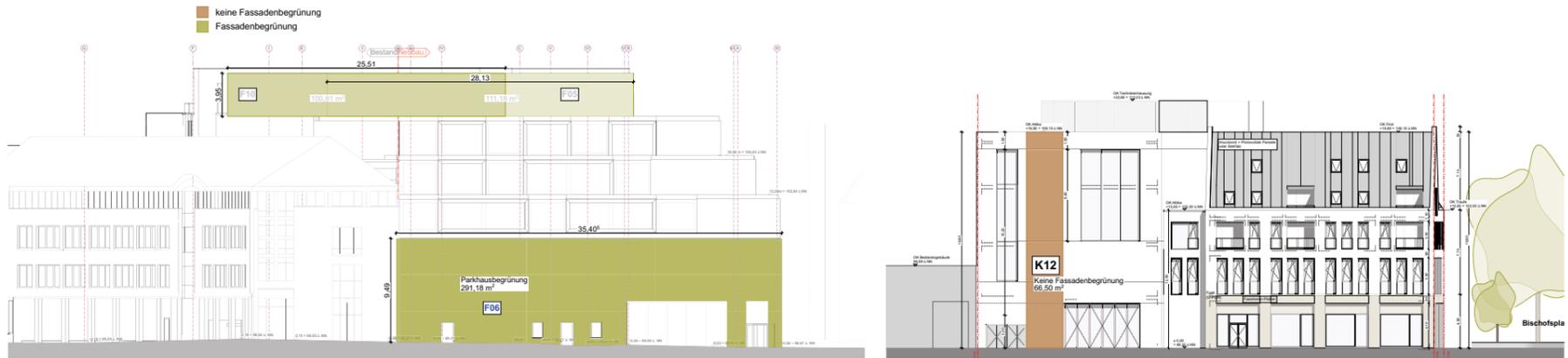
Ansicht Innenhof Fuststraße



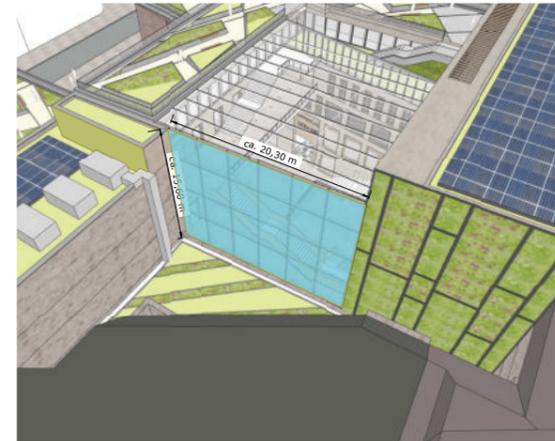
Ansicht Ost Fuststraße / Bischofsplatz (Ost)



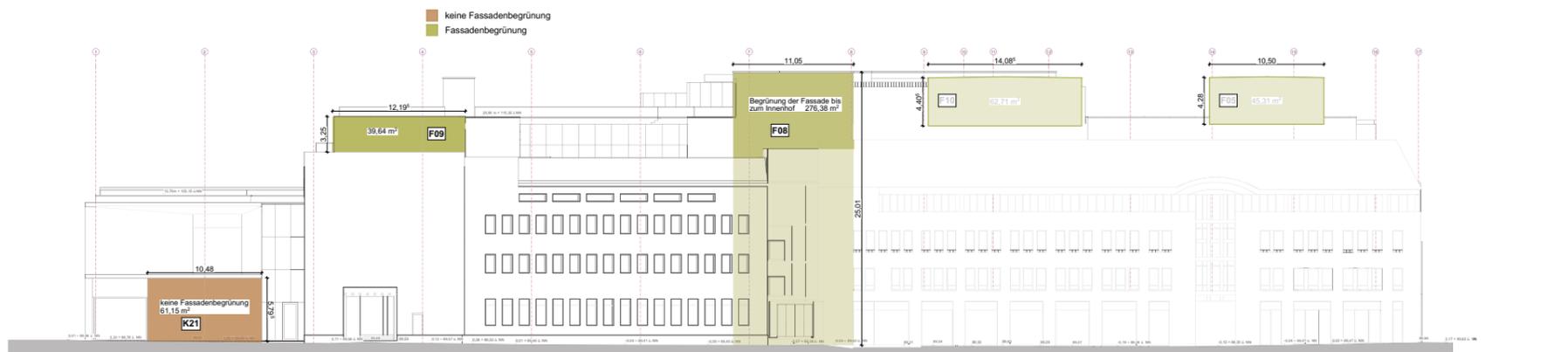
Dachaufsicht Innenhof Fuststraße



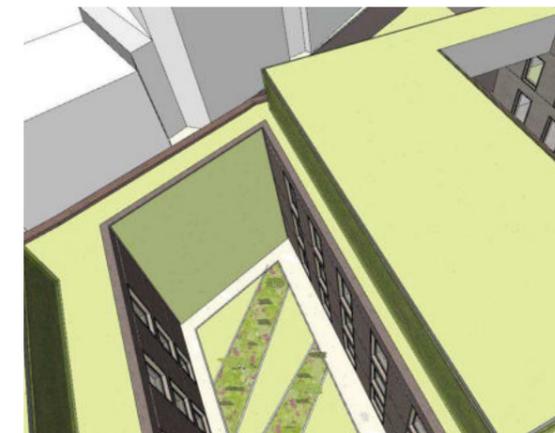
Ansicht Süd Eppichmurgasse



Übergang Deutsche Bank - PopUpHalle LU



Ansicht West Weißbühlengasse



Begrünte Fassade im Innenhof Hotel LU

**AUFBAUTEN WÄNDE / DECKEN**

**LEGENDE**

- Grundstücksgrenze
- Bestandsfläche gem. Vermesser
- Baulinie
- Baugrenze
- Höhenkoten geplant gem. Freiraumplaner
- Höhenkoten Bestandsfläche gem. Vermesser
- Fußbodenhöhen geplant gem. FA bezogen auf ±0,00
- Höhenkoten Rohkonstruktion bezogen auf ±0,00
- Höhenkoten Fertigkonstruktion bezogen auf ±0,00

**PLAN-NR.** BLU-AR-E-AN-ÜB-LU-00-VO-Fassadenbegrünung

**ÜBERSICHT**

Höhe EG = +10,00 m Höhe = 85,40 m ü.N.N.

**PROJEKT** BLU Ludwigstraße und Fuststraße  
Ludwigstraße 12  
55116 Mainz

**BAUHERR** Boulevard LU GmbH & Co. KG  
Rheinstraße 194 b  
55218 Ingelheim a. Rhein

**ARCHITEKT** FAERBER ARCHITECTEN  
GRÖSSE WEISSGASSE 11 55116 MAINZ  
TEL 06131-99608-0 FAX 06131-99608-30  
MAIL@FAERBER-ARCHITECTEN.DE

**PLANNHALT** GEZEICHNET SA | DSR | CS MASSTAB 1:200, 1:1,11, 1:1/5, 50  
DATUM 17.04.2023

**Entwurfsplanung** BLU-AR-E-AN-ÜB-LU-00-VO-Fassadenbegrünung

## BLU\_Auflistung der Fassadenbegrünung

Lage	Nr	Qualität bzw. Realisierungsmöglichkeit	Fläche	Hinweise
<b>Außenfassaden</b>				
Ansicht Ludwigstraße	F02	Technikeinhausung; alternative Begrünungsmethoden	234 m <sup>2</sup>	Nur mit Zustimmung Denkmalschutz / Stadtplanung - gilt es zu prüfen - optional
Ansicht Ludwigstraße	K02		29 m <sup>2</sup>	
	K06		29 m <sup>2</sup>	
	K09		43 m <sup>2</sup>	
Ansicht Fuststraße / Bischofsplatz	F03	Bodenanschluss	455 m <sup>2</sup>	
	F04	Bodenanschluss	63 m <sup>2</sup>	
	F07	Bodenanschluss	62 m <sup>2</sup>	
Ansicht Fuststraße / Bischofsplatz	K10		61 m <sup>2</sup>	
	K12		67 m <sup>2</sup>	Kulturfassade
	K14		30 m <sup>2</sup>	
Ansicht Eppichmauergasse	F06	Bodenanschluss	291 m <sup>2</sup>	unter Beachtung Brandschutz (TG Belüftung)
Ansicht Weißliliengasse	F08	alternative Begrünungsmethoden	276 m <sup>2</sup>	
	F09	alternative Begrünungsmethoden	40 m <sup>2</sup>	
	F10	Technikeinhausung; alternative Begrünungsmethoden	270 m <sup>2</sup>	Nur mit Zustimmung Denkmalschutz / Stadtplanung - gilt es zu prüfen - optional
	F05	Technikeinhausung; alternative Begrünungsmethoden	304 m <sup>2</sup>	Nur mit Zustimmung Denkmalschutz / Stadtplanung - gilt es zu prüfen - optional
Ansicht Weißliliengasse	K21		59 m <sup>2</sup>	
<b>Außenfassade Begrünung</b>			<b>1.187 m<sup>2</sup></b>	
<b>Außenfassade keine Begrünung</b>			<b>317 m<sup>2</sup></b>	16
je 20 m <sup>2</sup> nichtbegrünter Fassade sind mit 5 m <sup>2</sup> Strauchfläche auszugleichen				<b>Herzustellende Strauchfläche = 16 x 5 m<sup>2</sup> = 80 m<sup>2</sup></b>
<b>Fassaden in Innenhöfen</b>				
Halle - Deutsche Bank	F12	berankte Drahtseile o.ä.	248 m <sup>2</sup>	Noch nicht genau geplant - eher Kunst
Innenhof Hotel	F13	alternative Begrünungsmethoden	126 m <sup>2</sup>	
Innenhof Fuststraße	F14	alternative Begrünungsmethoden	206 m <sup>2</sup>	
<b>Fassaden in Innenhöfen gesamt</b>			<b>332 m<sup>2</sup></b>	
<b>Begrünte Fassade gesamt</b>			<b>1.519 m<sup>2</sup></b>	



- Gebäude Bestand
- 1\_LU Neubau
- 2\_Parkhaus Aufstockung
- 3\_Fuststraße Neubau
- Glasdach
- Attika
- Technikfläche
- Abstandsstreifen Brandschutz
- Schrägdach
- Dachfläche befestigt
- Intensive Begrünung mit Substrat  $\geq 60$  cm
- Intensive Begrünung mit Substrat  $< 60$  cm
- Extensive Begrünung
- Baum neu

	1 - Neubau LU (m²)	2 - Parkhaus Aufstockung (m²)	3 - Bestandsgebäude (m²)	4 - Neubau Fuststraße (m²)
Dachfläche gesamt(DF)	3.618	2.372	2.040	1.277
davon Glasdach(G)	712	0		0
davon Attika(A)	253	305		93
davon Abstandsstreifen Brandschutz(AS)	283	311		90
davon Schrägdach(SD)	0	0		481
davon Technikfläche (TF)	0	19		326
begrünbare Dachfläche (=DF-G-A-AS-TF-SD)	2.370	1.737		288

Anforderung nach DGS				
Begrünbare Dachfläche (100% der begrünbaren Dachfläche)	2.370	1.737	-	288

Planung				
Befestigte Fläche	1.166	0	523	19
Extensive begrünte Dachfläche (EB1.1)	805	1.349	523	32
Intensiv begrünte Dachfläche ; Substrat $< 60$ cm (EB1.2)	36	0	0	0
Intensiv begrünte Dachfläche; Substrat $\geq 60$ cm	363	388	0	236
Umrechnung der Dachbegrünungsfläche mit Substrat $\geq 60$ cm von Intensiv in Extensiv (EB2) (1m² entspricht 2m² extensiv begrünte Dachfläche)	726	776	0	473
Begrünbare Dachfläche gesamt (=EB1.1+EB1.2+EB2)	1.567	2.125	523	505
Differenz	-803	+388	+523	+218

	1 - Neubau LU (m <sup>2</sup> )	2 - Parkhaus Aufstockung (m <sup>2</sup> )	3 - Bestandsgebäude (m <sup>2</sup> )	4- Neubau Fuststraße (m <sup>2</sup> )
Dachfläche gesamt(DF)	3.618	2.372	2.040	1.277
davon Glasdach(G)	712	0		0
davon Attika(A)	253	305		93
davon Abstandstreifen Brandschutz(AS)	283	311		90
davon Schrägdach(SD)	0	0		481
davon Technikfläche (TF)	0	19		326
begrünbare Dachfläche (=DF-G-A-AS-TF-SD)	2.370	1.737		288

#### Anforderung nach DGS

Begrünbare Dachfläche (100% der begrünbaren Dachfläche)	2.370	1.737	-	288
--	-------	-------	---	-----

#### Planung

Befestigte Fläche	1.166	0		19
Extensive begrünte Dachfläche (EB1.1)	805	1.349	523	32
Intensiv begrünte Dachfläche ; Substrat < 60 cm (EB1.2)	36	0		0
Intensiv begrünte Dachfläche; Substrat ≥ 60 cm	363	388		236
Umrechnung der Dachbegrünungsfläche mit Substrat ≥ 60 cm von Intensiv in Extensiv (EB2) (1m <sup>2</sup> entspricht 2m <sup>2</sup> extensiv begrünte Dachfläche)	726	776		473
Begrünte Dachfläche gesamt (=EB1.1+EB1.2+EB2)	1.567	2.125	523	505
Differenz	-803	+388	+523	+218

## 6 Anhang: Abbildungstabeln

Abbildung 1a: 3D Ansicht  
Status-Quo

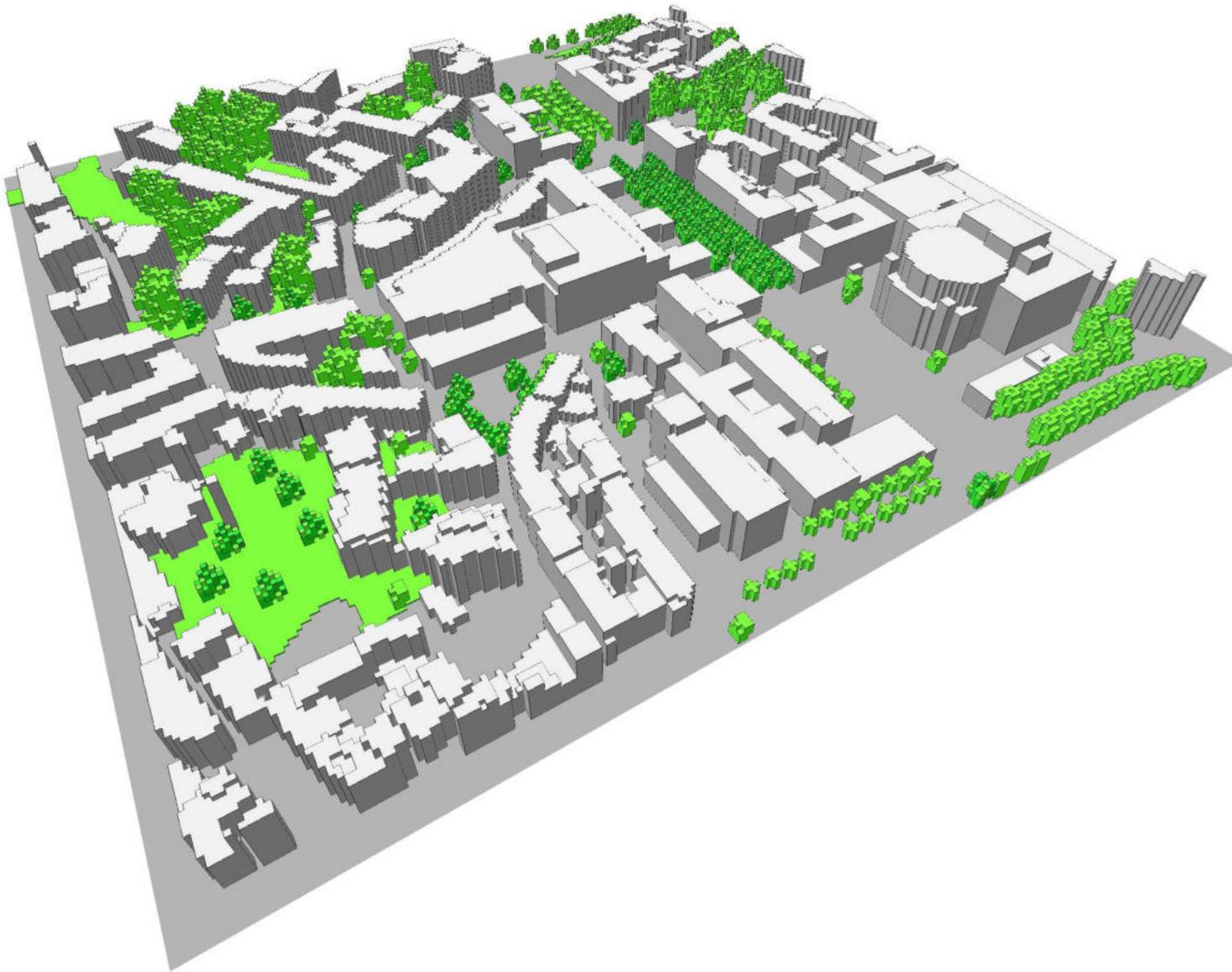
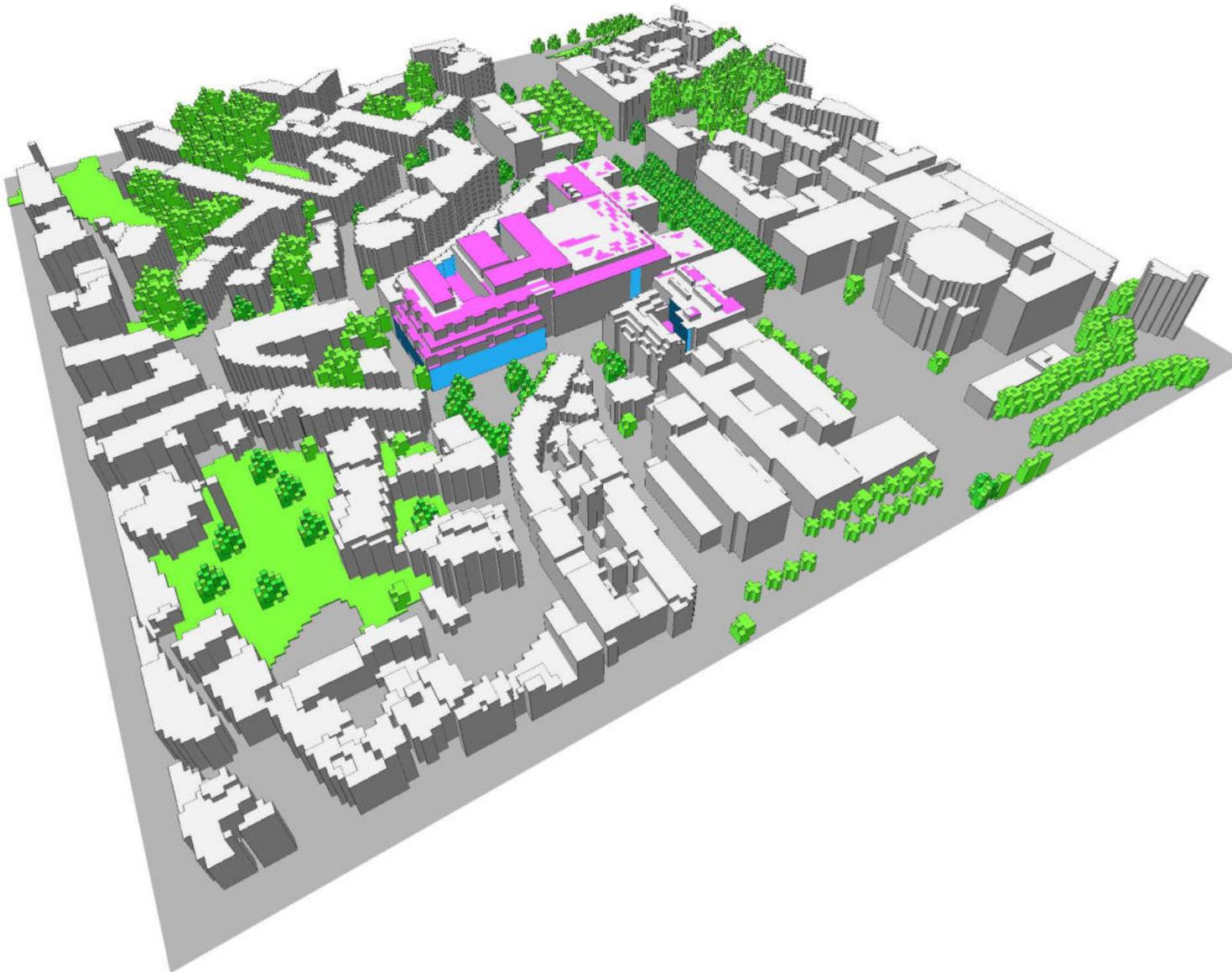
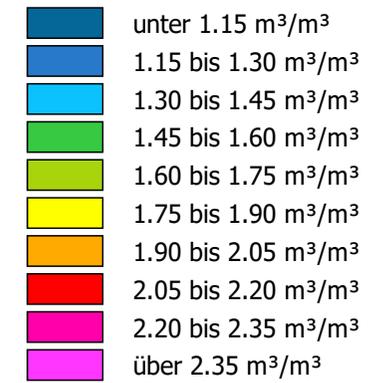


Abbildung 1b: 3D Ansicht  
extensive Begrünung

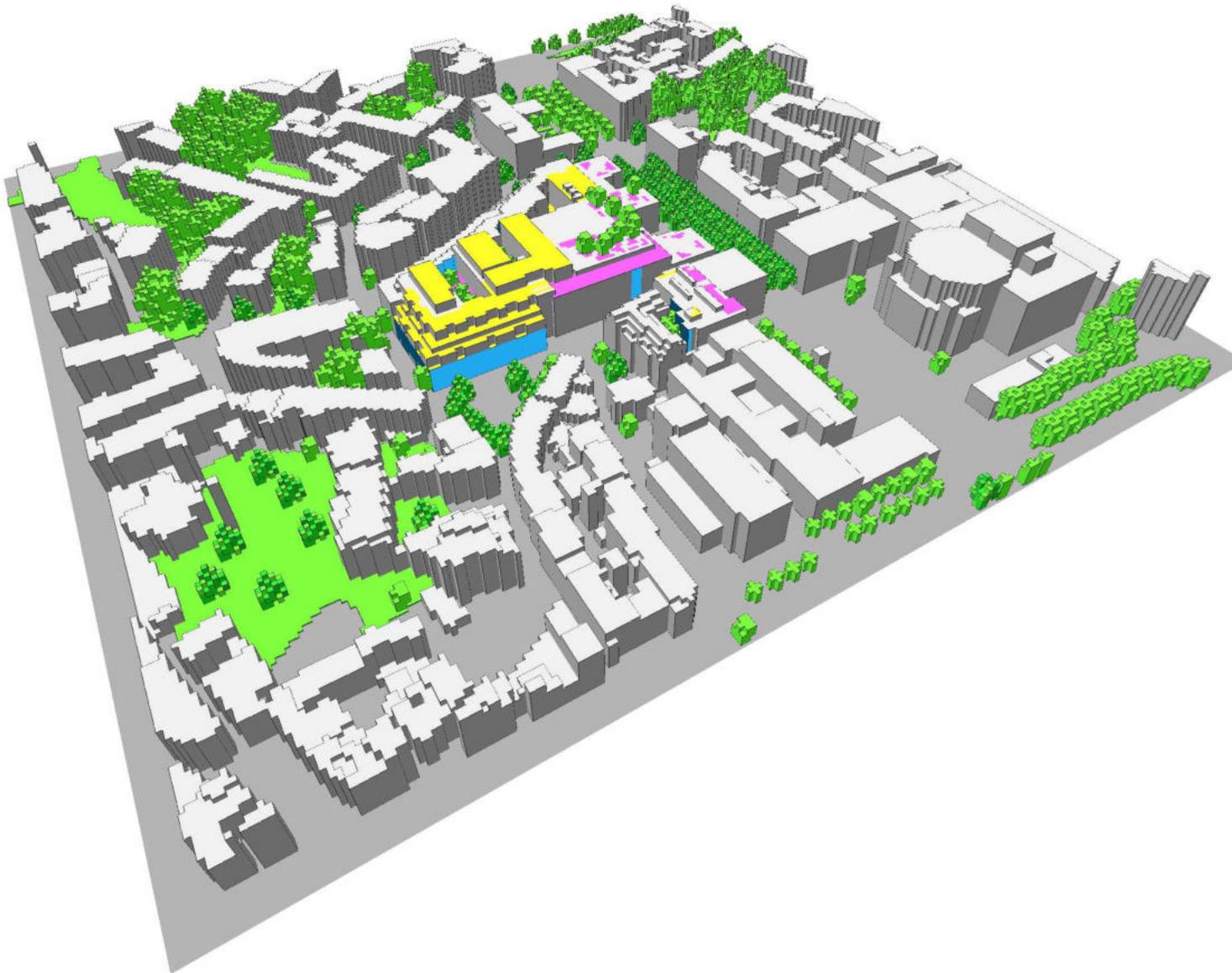


***Facade/ Roof Greening LAI***



Min: 1.00 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
Max: 2.50 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

Abbildung 1c: 3D Ansicht  
ideale Planung



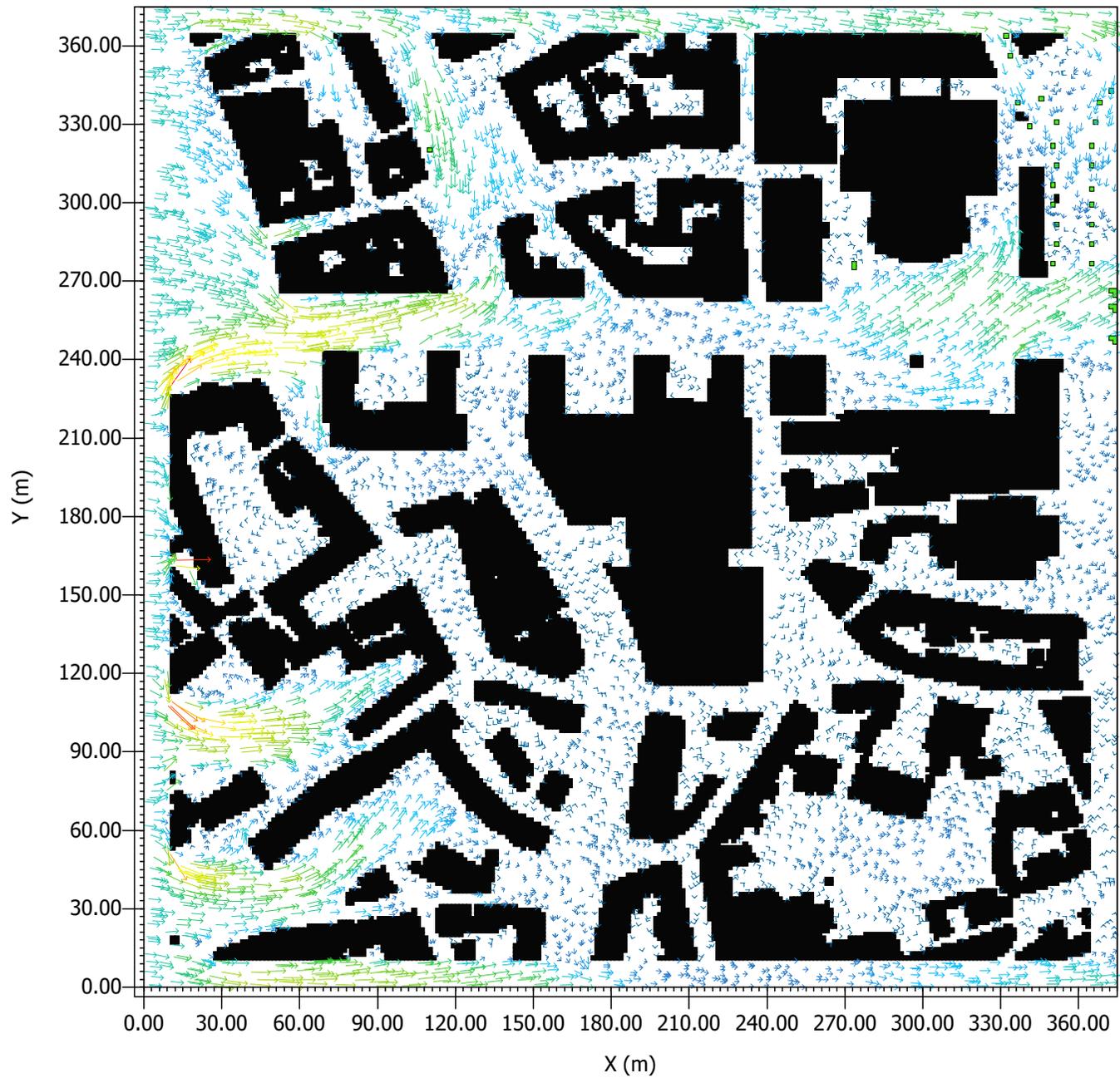
***Facade/ Roof Greening LAI***

Dark Blue	unter 1.30 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Blue	1.30 bis 1.60 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Light Blue	1.60 bis 1.90 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Green	1.90 bis 2.20 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Light Green	2.20 bis 2.50 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Yellow	2.50 bis 2.80 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Orange	2.80 bis 3.10 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Red	3.10 bis 3.40 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Magenta	3.40 bis 3.70 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Pink	über 3.70 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

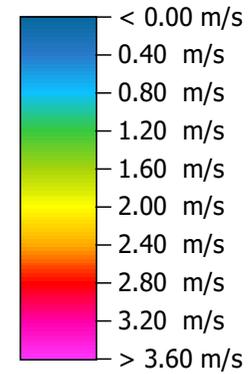
Min: 1.00 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
Max: 4.00 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

# Abbildung 2a: Windfeld Status-Quo

x/y Schnitt bei  $k=4$  ( $z=1.8000$  m)



## Wind Speed



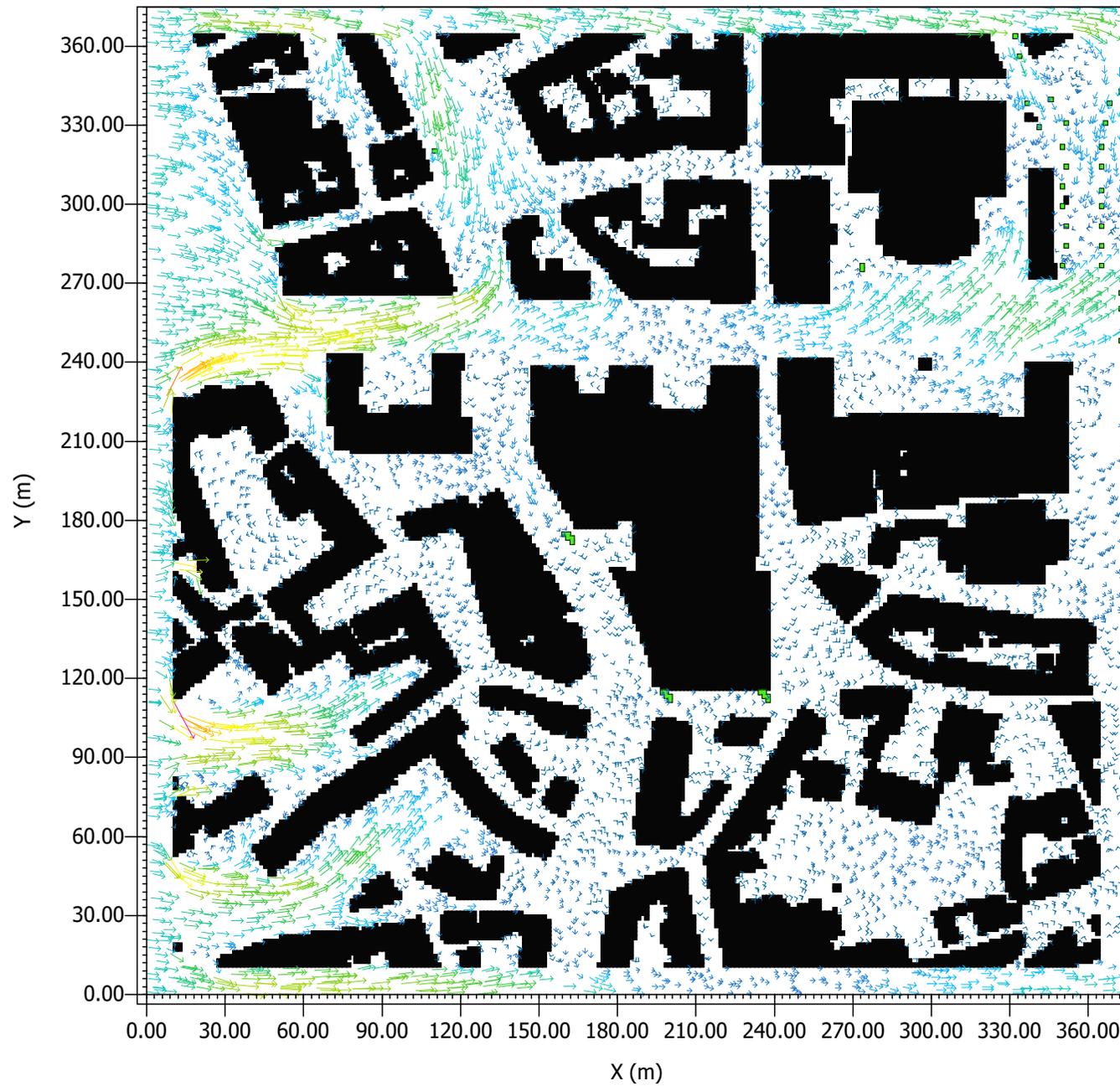
Min: 0.00 m/s  
Max: 3.23 m/s



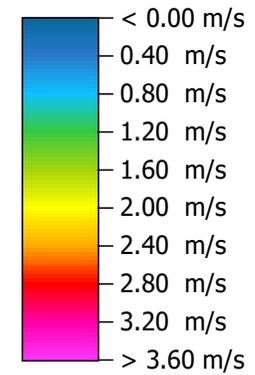
Wind

# Abbildung 2b: Windfeld Planung Ideal

x/y Schnitt bei k=4 (z=1.8000 m)



## Wind Speed



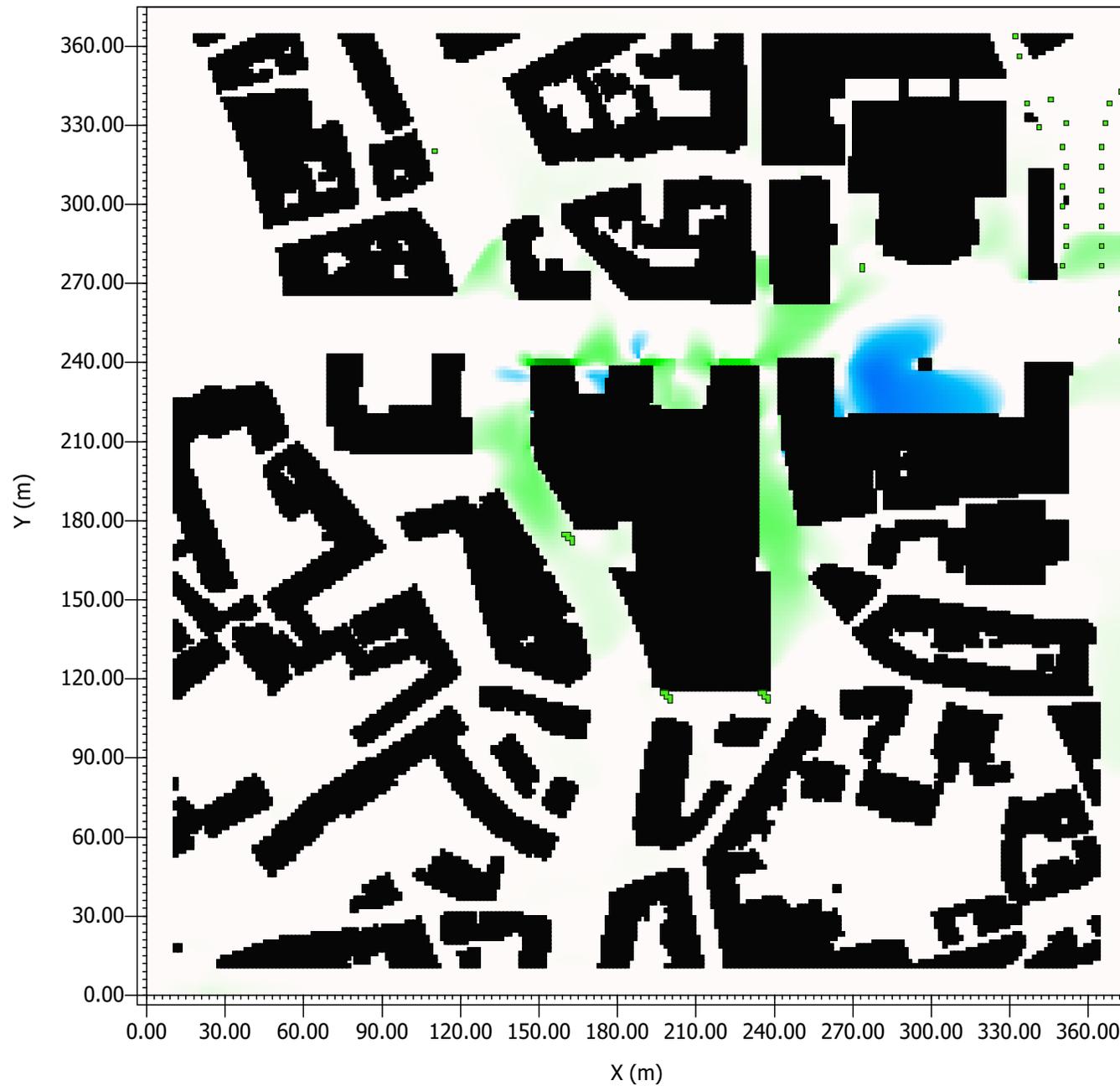
Min: 0.00 m/s  
Max: 3.23 m/s



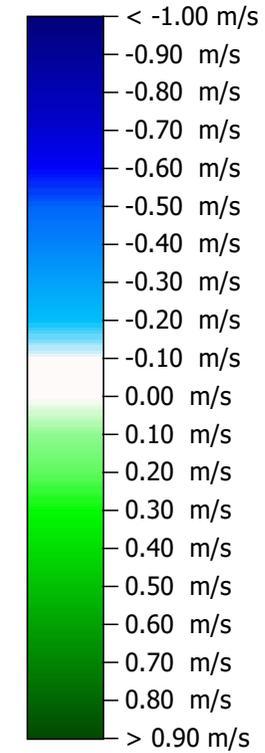
Wind

# Abbildung 2c: Vergleich Windfeld Status-Quo vs. Planung Ideal

x/y Schnitt bei k=4 (z=1.8000 m)



## *absoluter Unterschied Wind Speed*



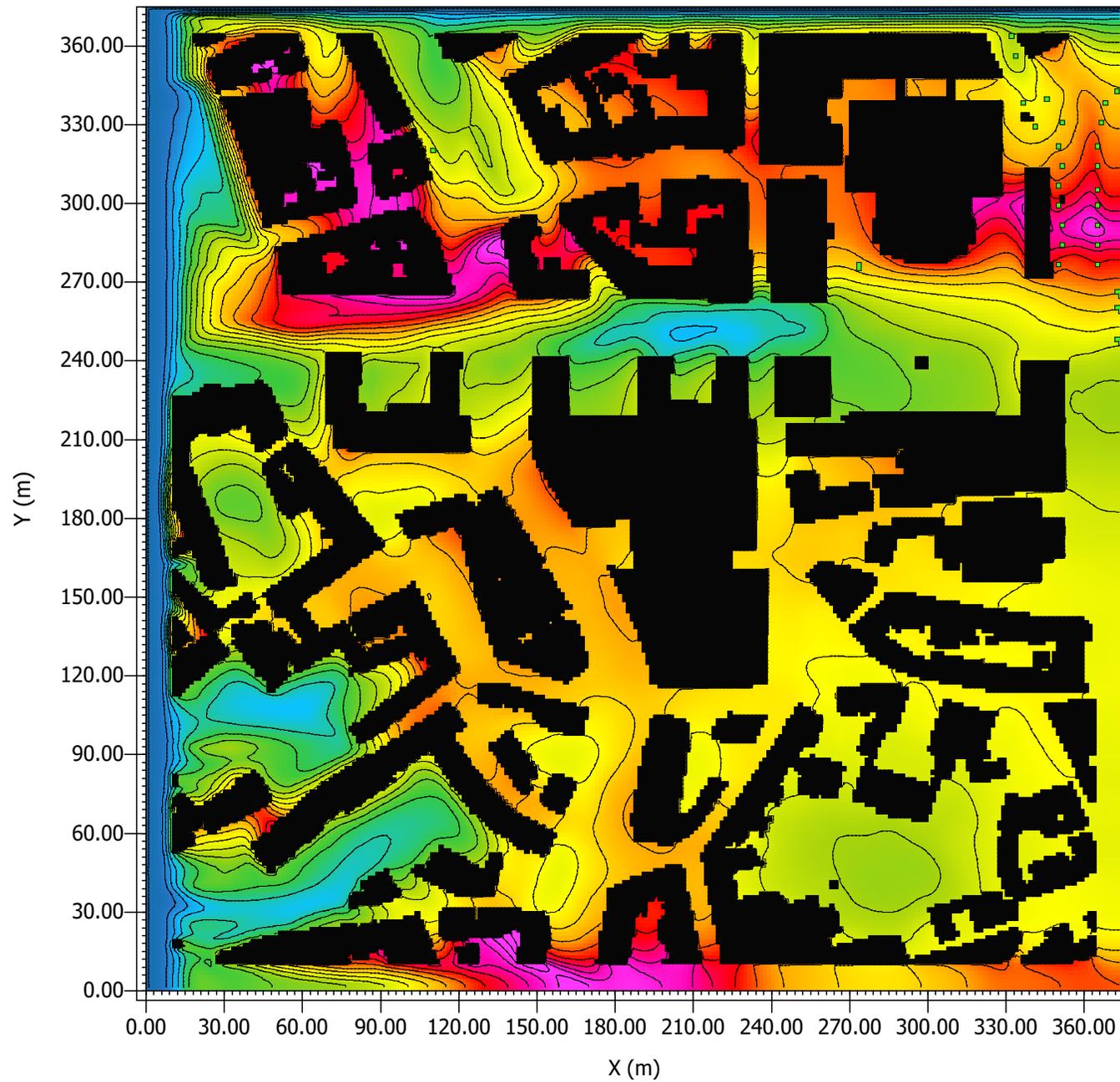
Min: -0.45 m/s  
Max: 0.63 m/s



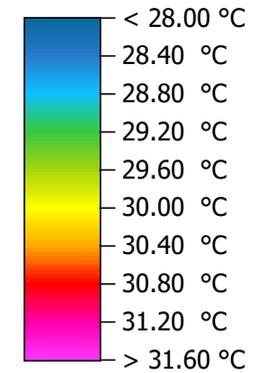
Wind

Abbildung 3a: Status-Quo  
Lufttemperatur 2 m 15:00

x/y Schnitt bei k=4 (z=1.8000 m)



**Potential Air Temperature**



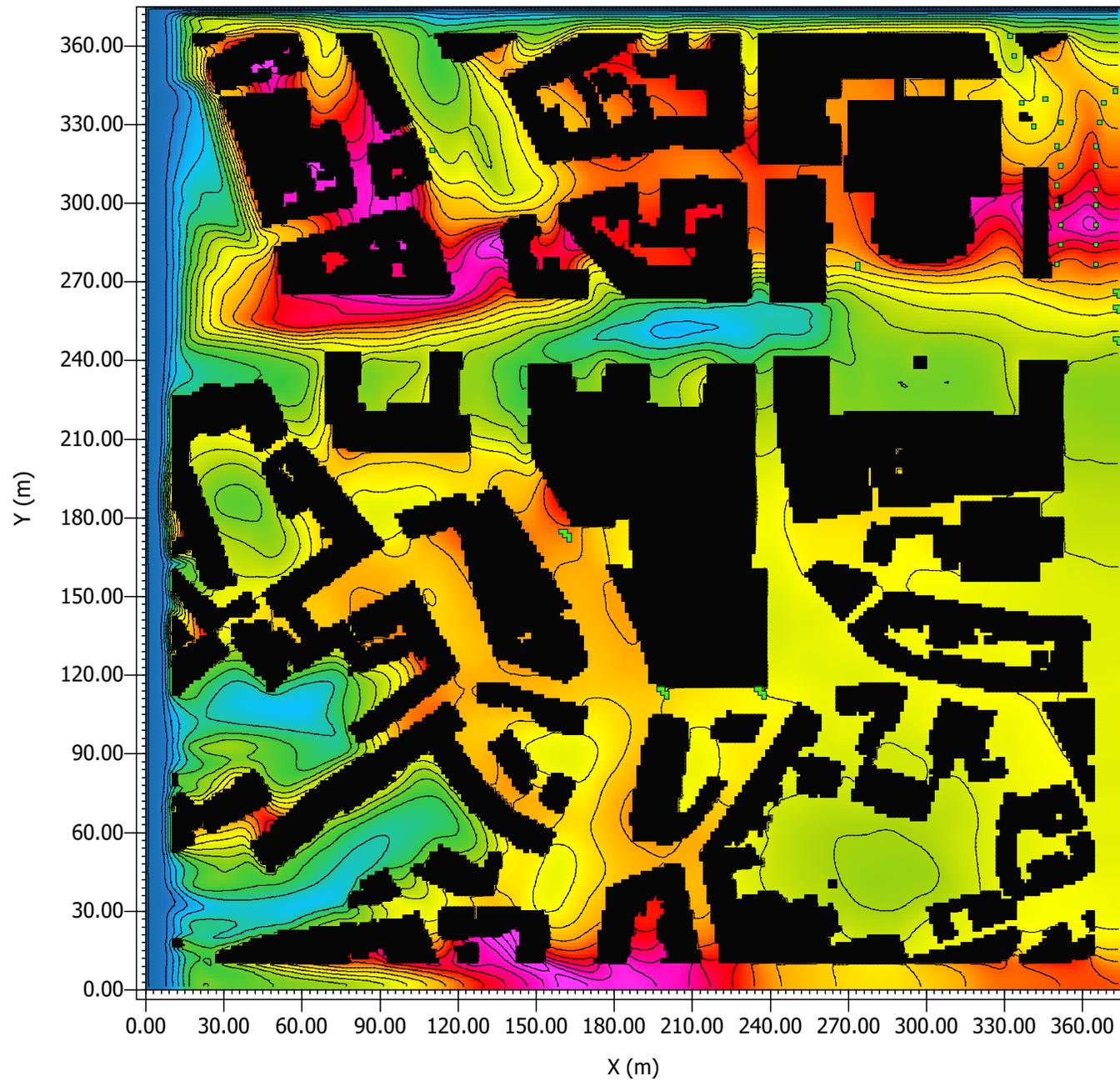
Min: 28.20 °C  
Max: 32.19 °C



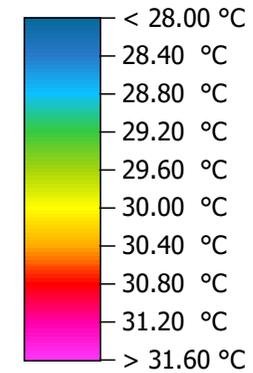
Sonne

Abbildung 3b:  
Planung Extensiv  
Lufttemperatur 2 m, 15:00

x/y Schnitt bei k=4 (z=1.8000 m)



**Potential Air Temperature**



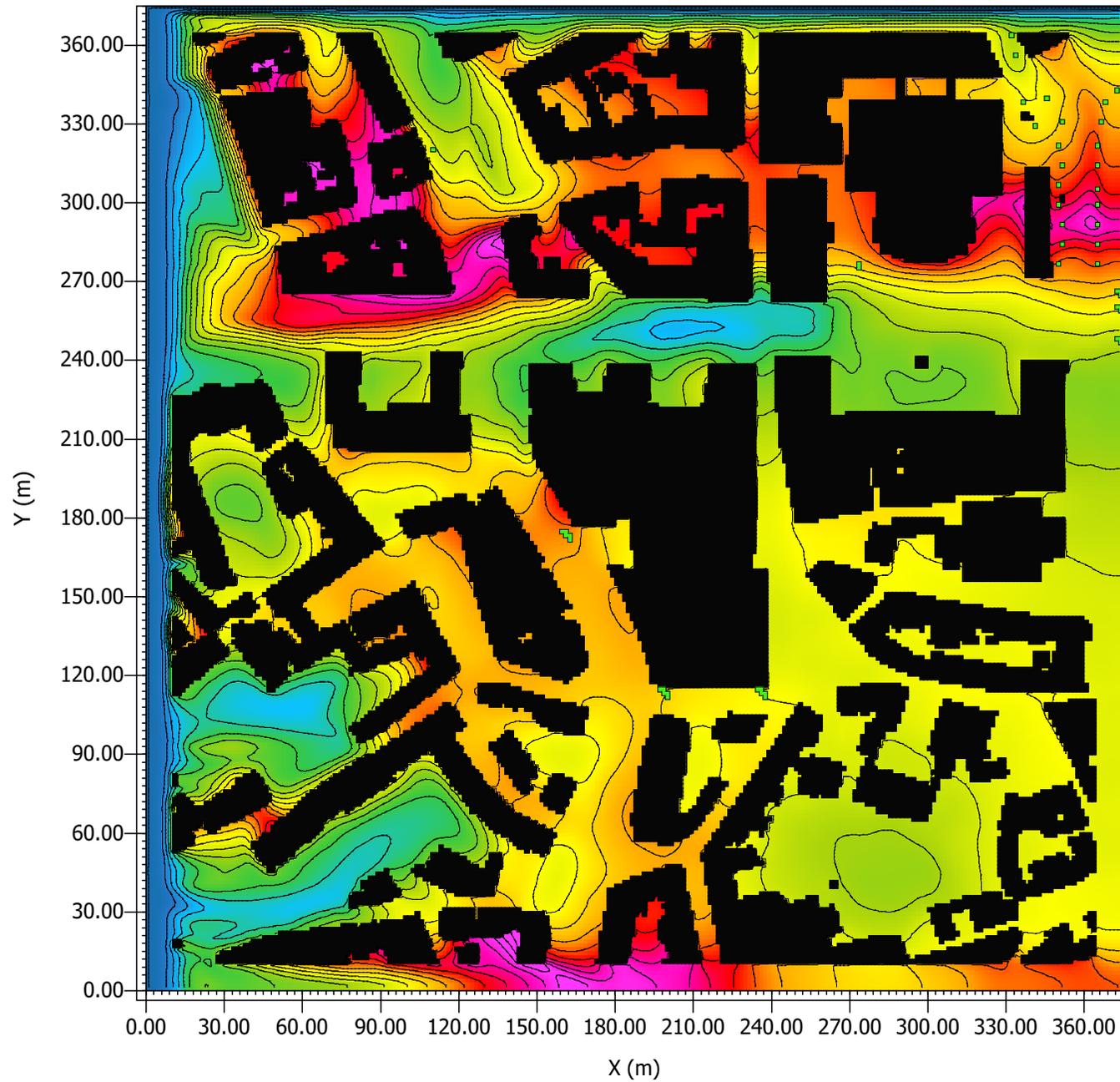
Min: 28.20 °C  
Max: 32.18 °C



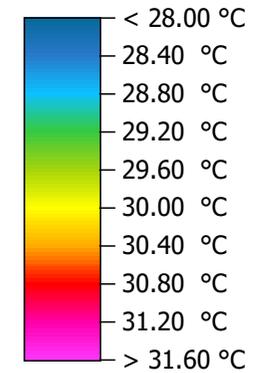
Sonne

Abbildung 3c:  
Planung Ideal Lufttemperatur  
2 m, 15:00

x/y Schnitt bei k=4 (z=1.8000 m)



**Potential Air Temperature**



Min: 28.20 °C  
Max: 32.17 °C



Sonne

Abbildung 3d: Vergleich  
Planung Extensiv vs. Status  
Quo, Lufttemperatur 2 m, 15:00

x/y Schnitt bei k=4 (z=1.8000 m)

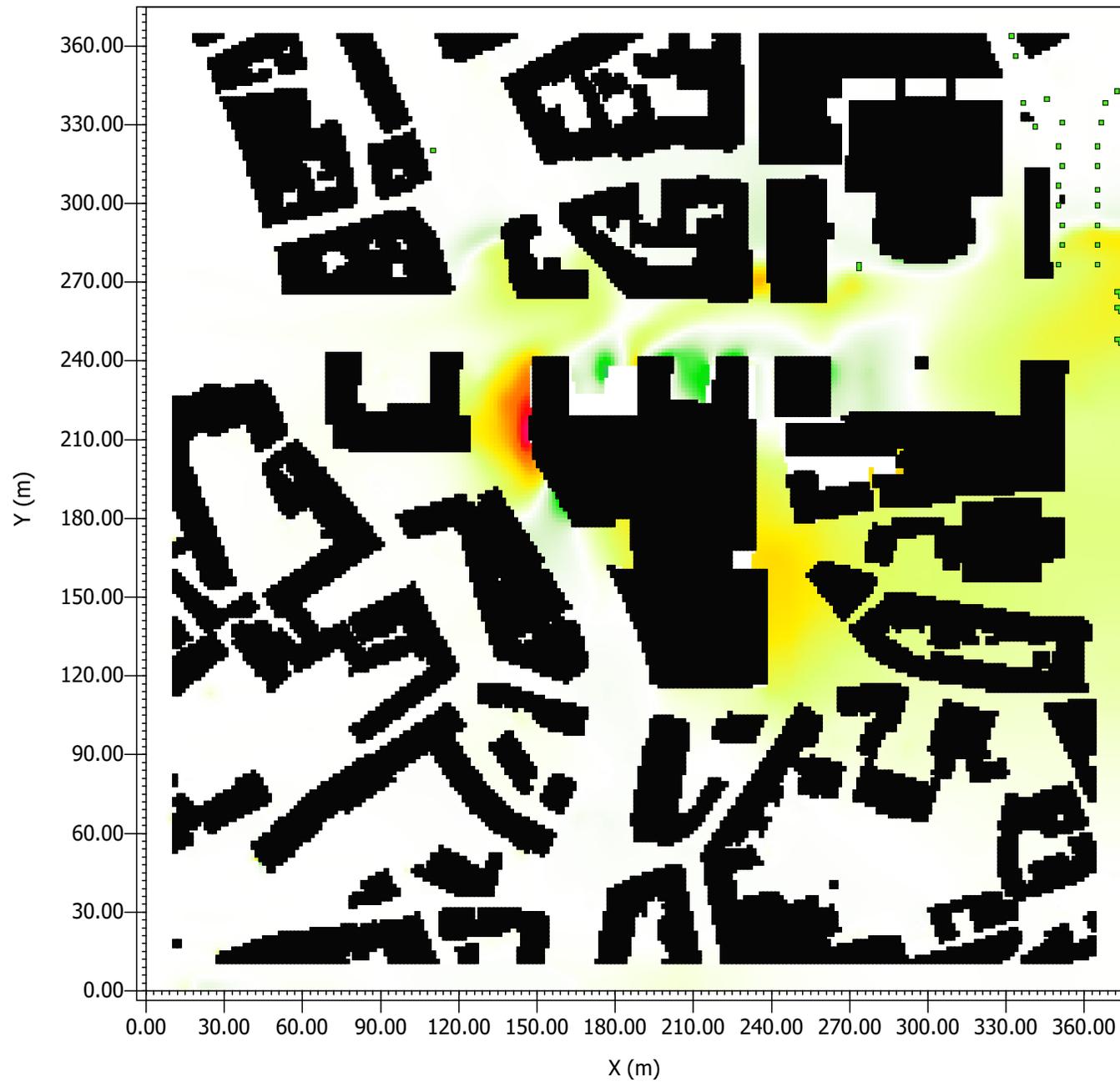
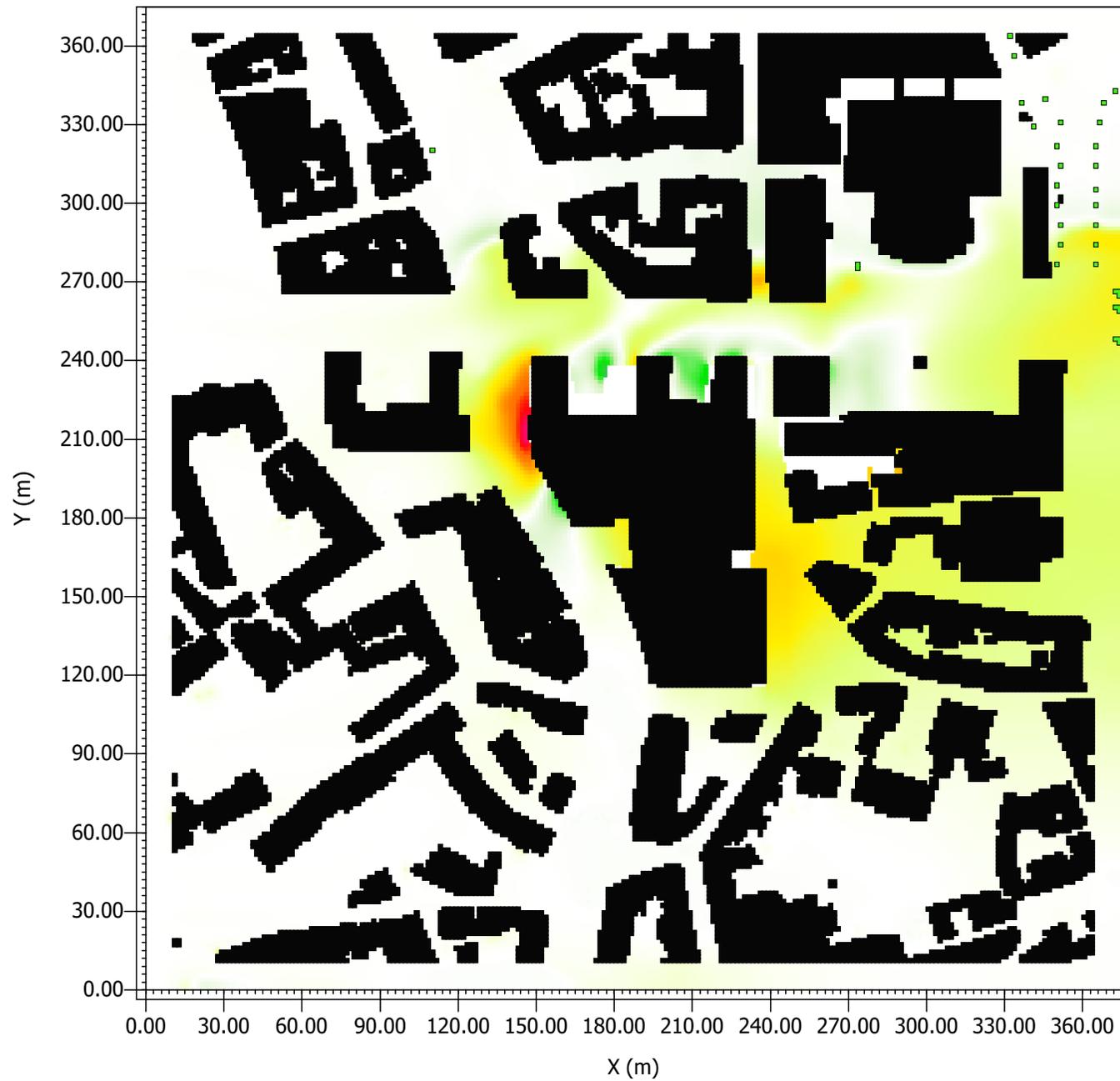
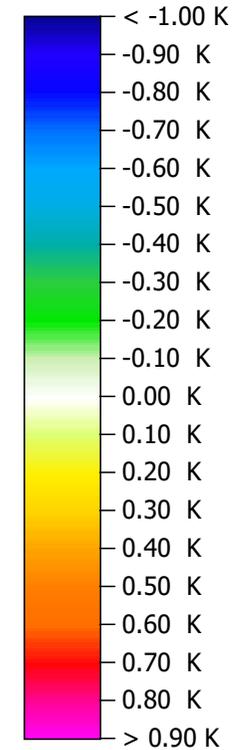


Abbildung 3e: Vergleich  
Planung Ideal vs. Status Quo,  
Lufttemperatur 2 m, 15:00

x/y Schnitt bei k=4 (z=1.8000 m)



**absoluter Unterschied  
Potential Air Temperature**



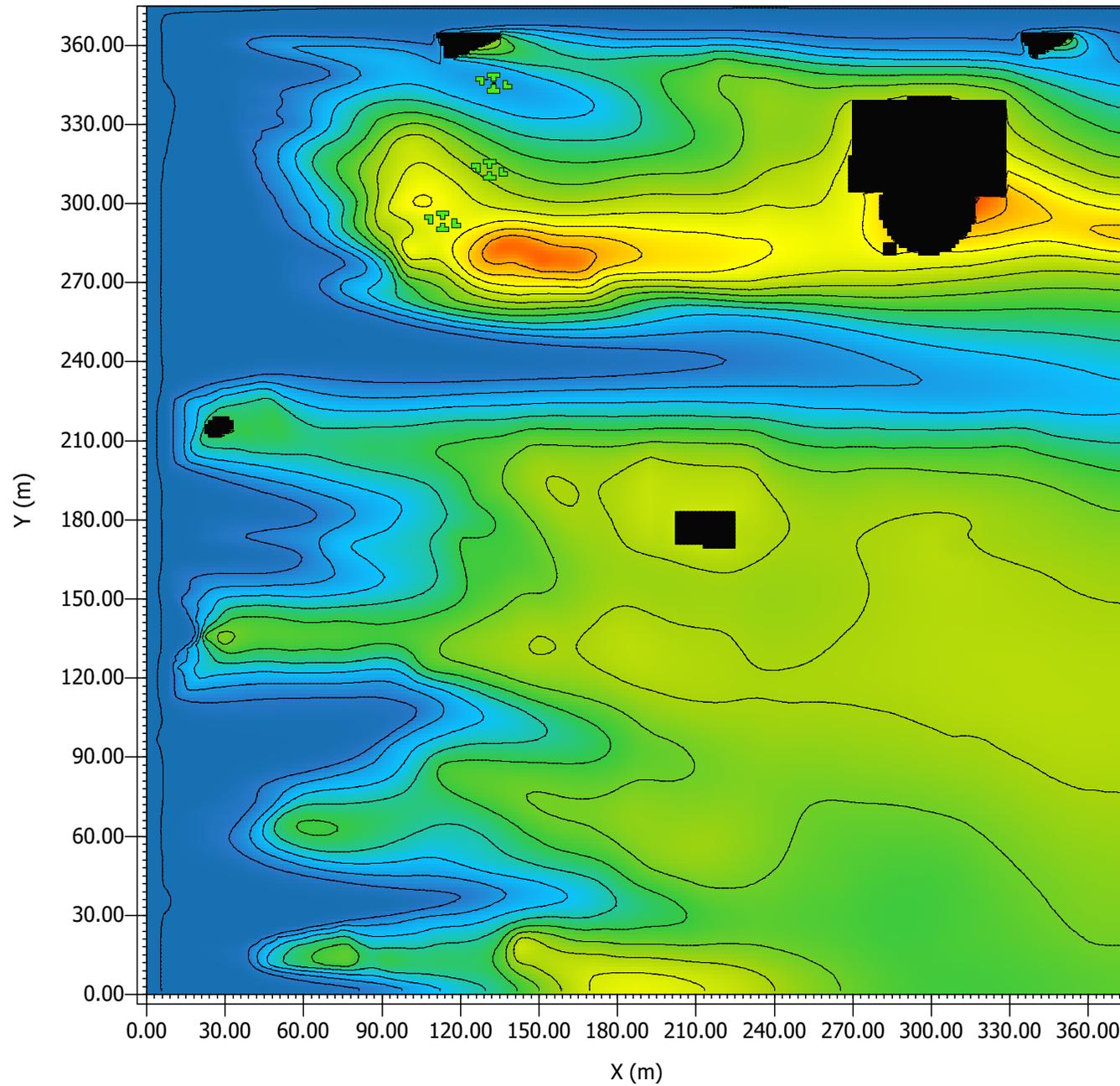
Min: -0.31 K  
Max: 0.77 K



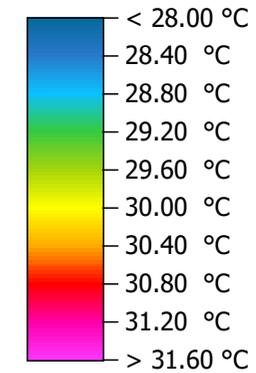
Sonne

# Abbildung 4a: Status-Quo, Lufttemperatur 23 m, 15:00

x/y Schnitt bei k=15 (z=23.0000 m)



## Potential Air Temperature



Min: 28.20 °C  
Max: 30.62 °C

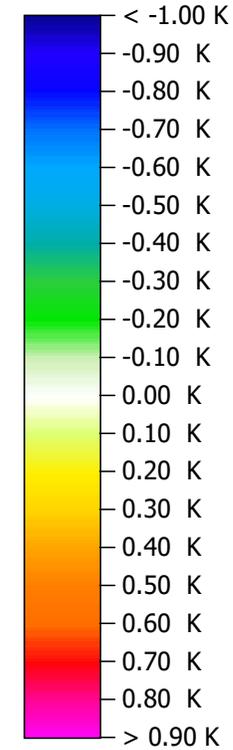


Sonne

Abbildung 4b: Vergleich  
Planung Extensiv vs. Status-  
Quo, Lufttemperatur 23 m,  
15:00

x/y Schnitt bei k=15 (z=23.0000 m)

**absoluter Unterschied  
Potential Air Temperature**



Min: -0.43 K  
Max: 0.12 K

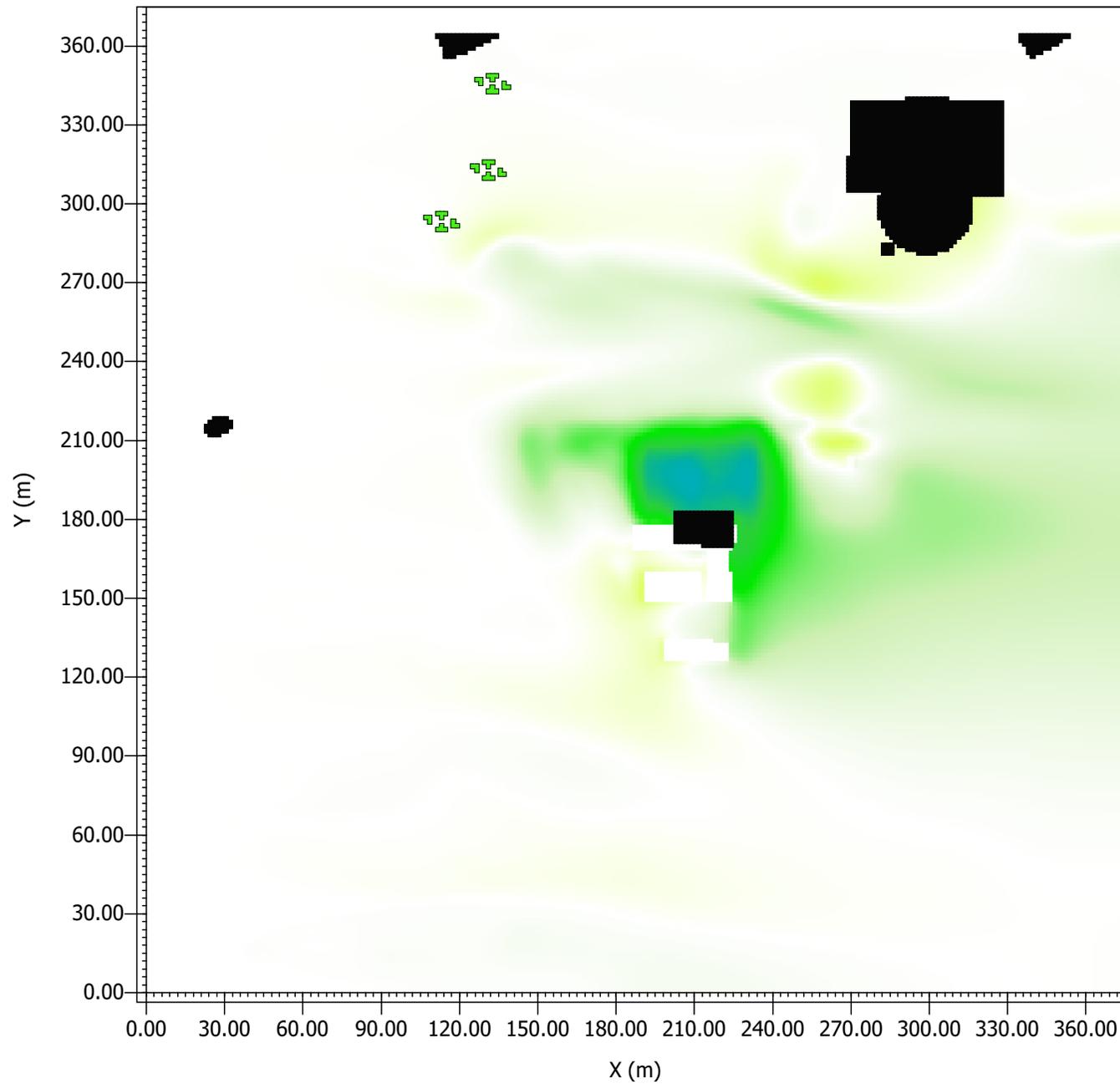
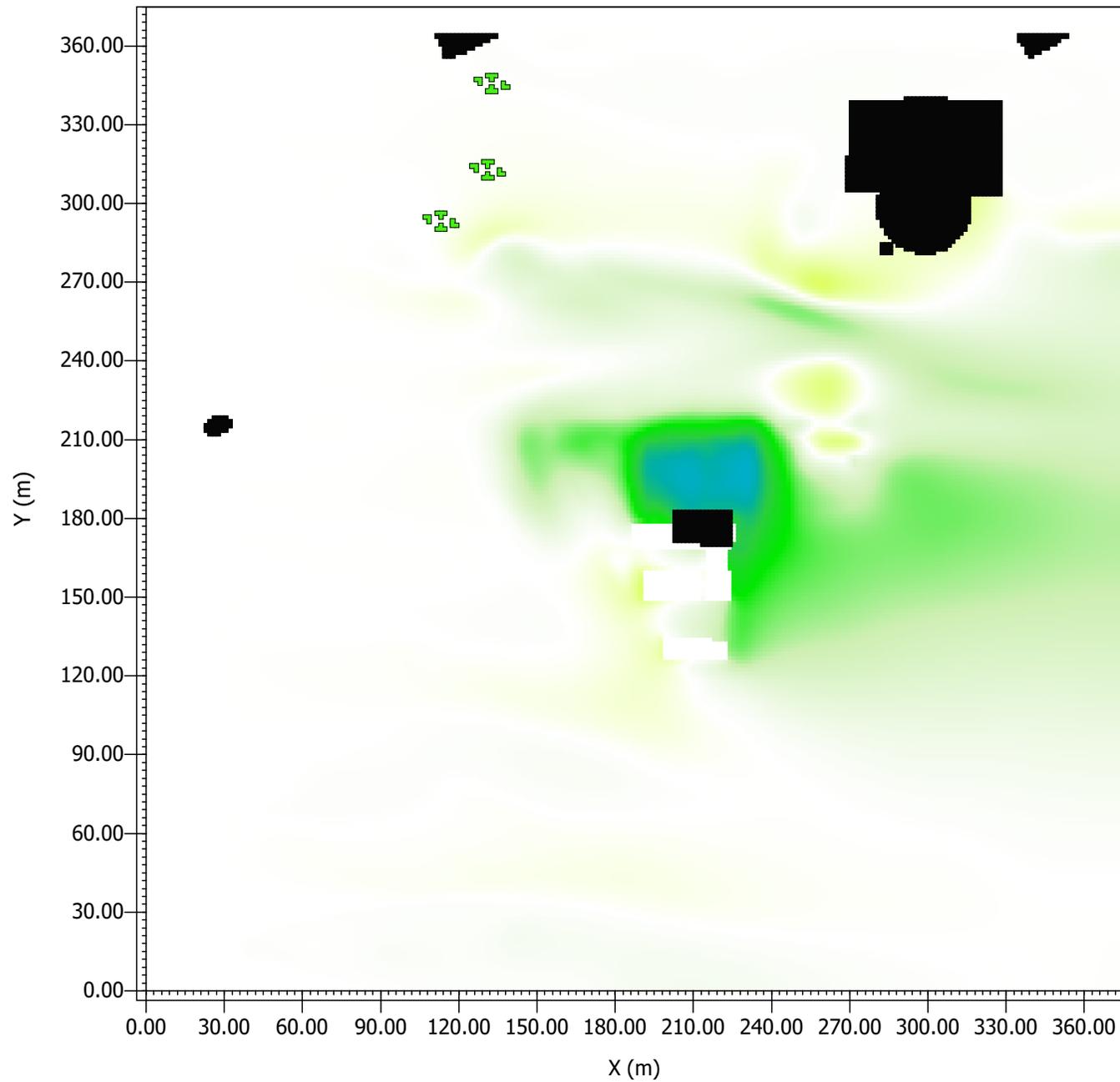
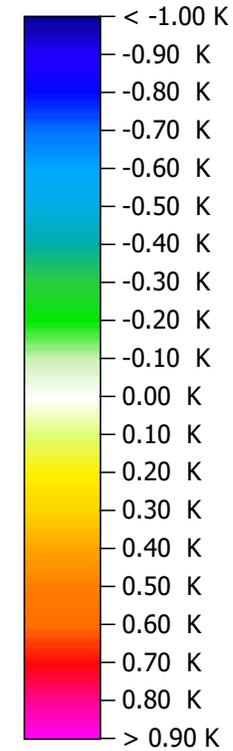


Abbildung 4c: Vergleich  
Planung Ideal vs. Status-Quo,  
Lufttemperatur 23 m, 15:00

x/y Schnitt bei k=15 (z=23.0000 m)



**absoluter Unterschied  
Potential Air Temperature**

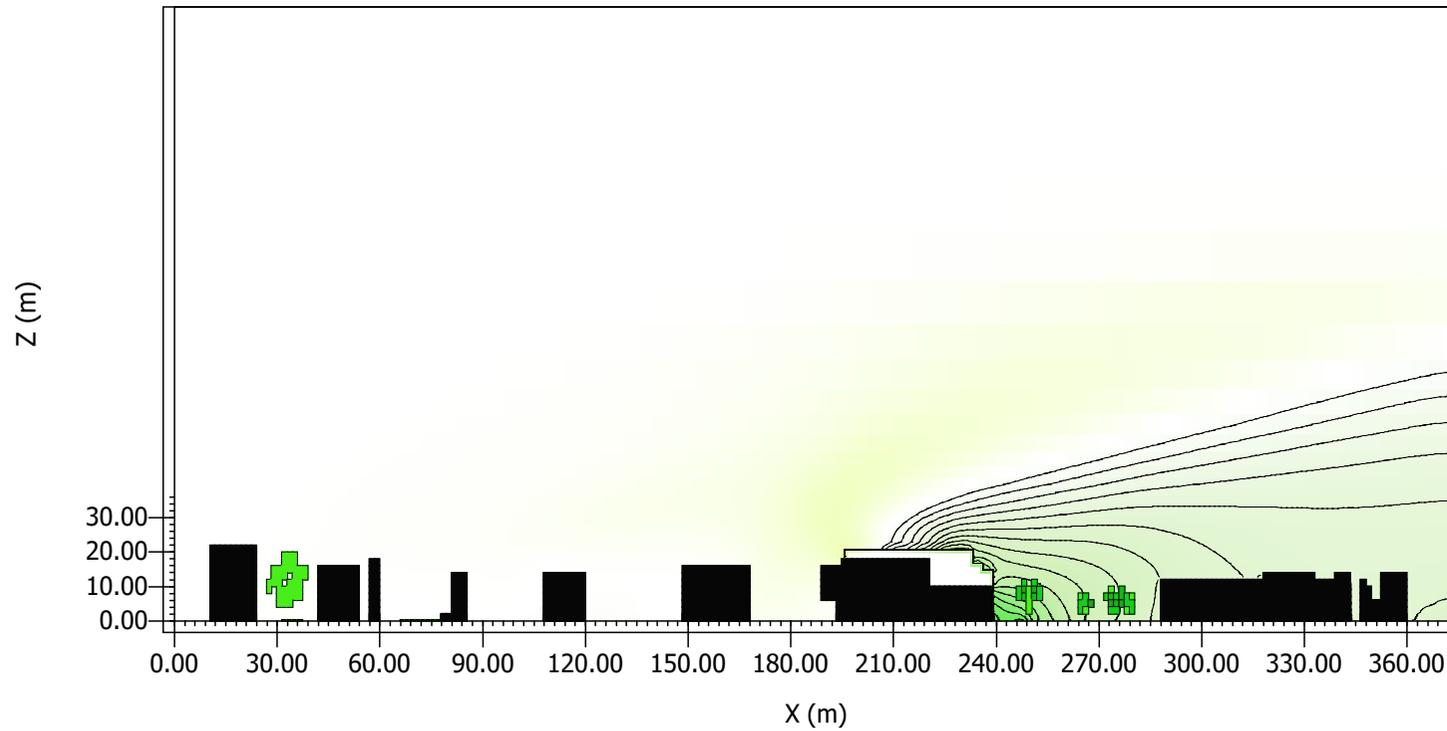


Min: -0.46 K  
Max: 0.11 K

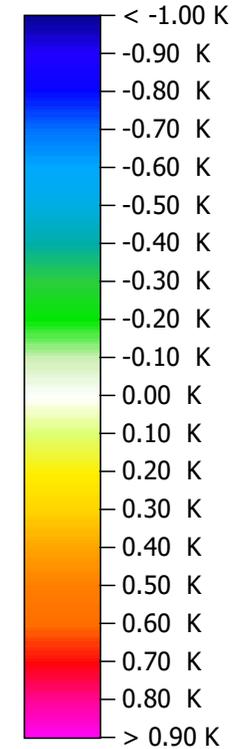


Abbildung 5a: Vergleich  
Planung Extensiv vs. Status-  
Quo, Vertikalschnitt  
Lufttemperatur, 15:00

x/z Schnitt bei j=81 (y=122.2500 m)



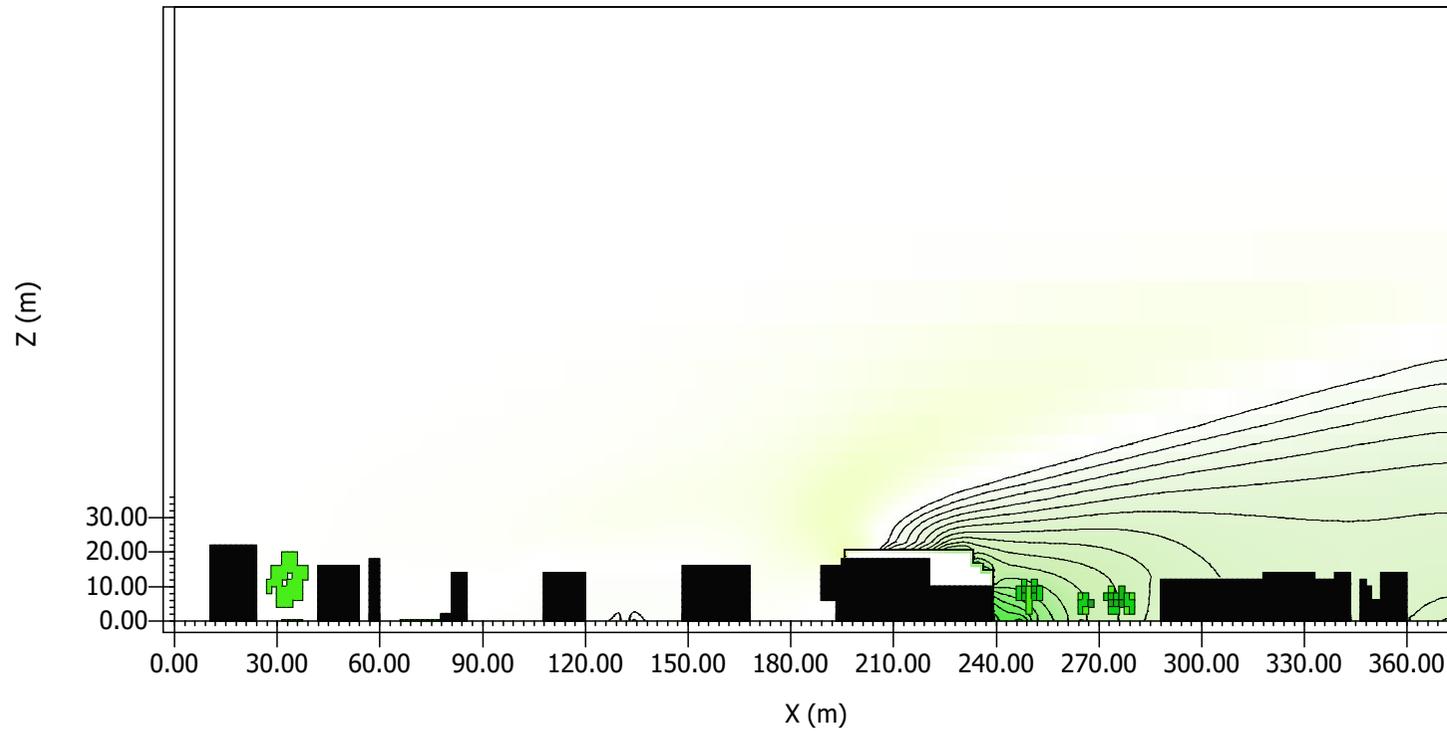
**absoluter Unterschied  
Potential Air Temperature**



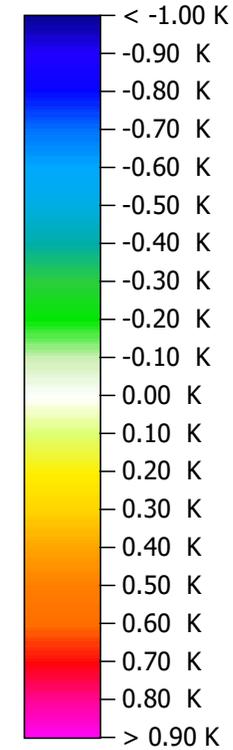
Min: -0.16 K  
Max: 0.07 K

Abbildung 5b: Vergleich  
Planung Ideal vs. Status-Quo,  
Vertikalschnitt  
Lufttemperatur, 15:00

x/z Schnitt bei j=81 (y=122.2500 m)

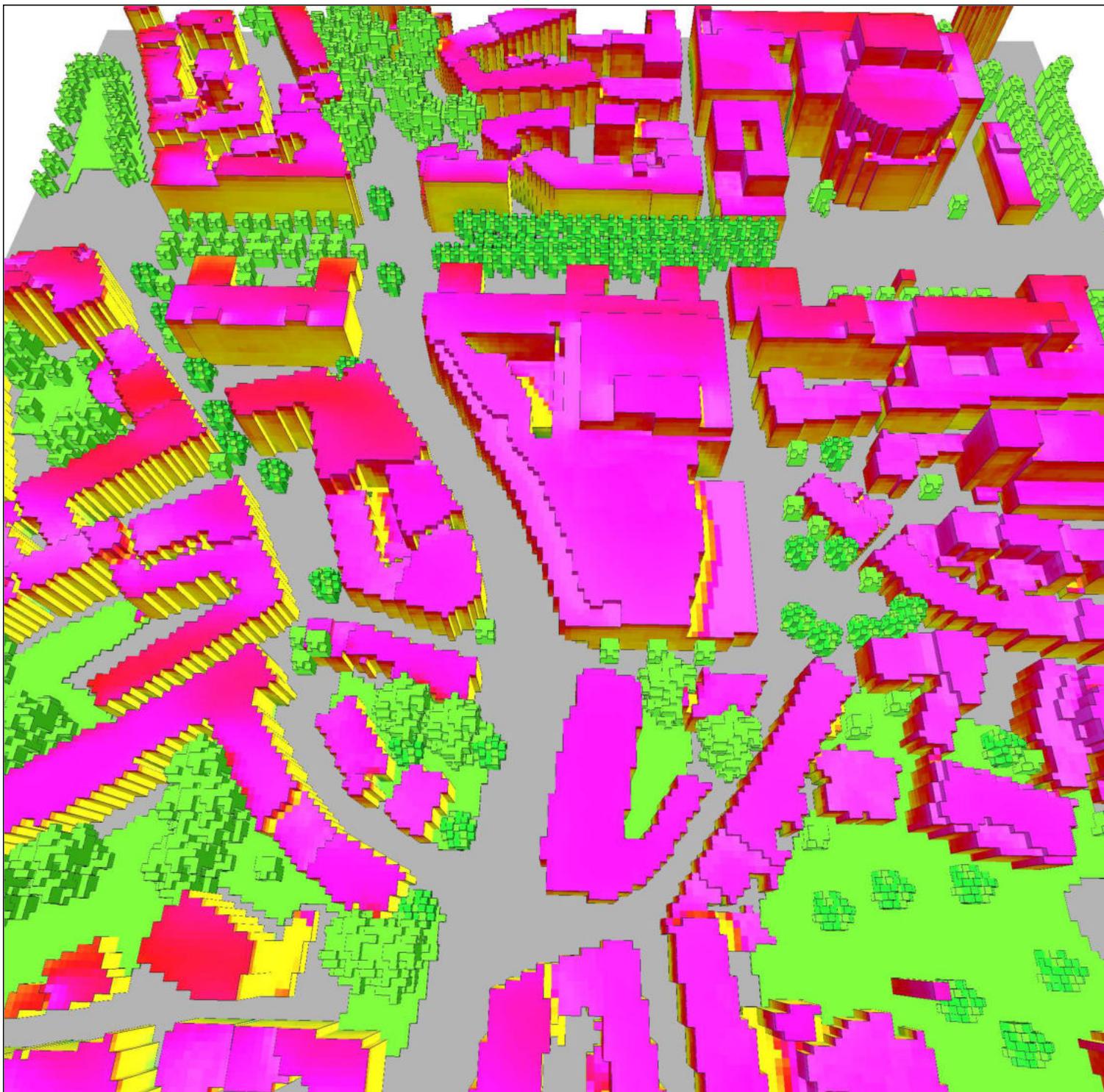


**absoluter Unterschied  
Potential Air Temperature**

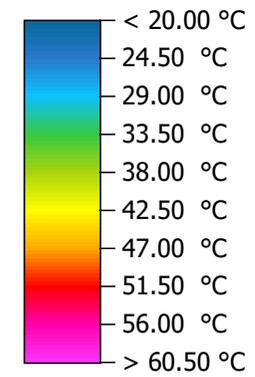


Min: -0.17 K  
Max: 0.06 K

Figure 6a: Status-Quo  
Oberflächentemperatur Gebäude  
15.00.01 05.07.2018

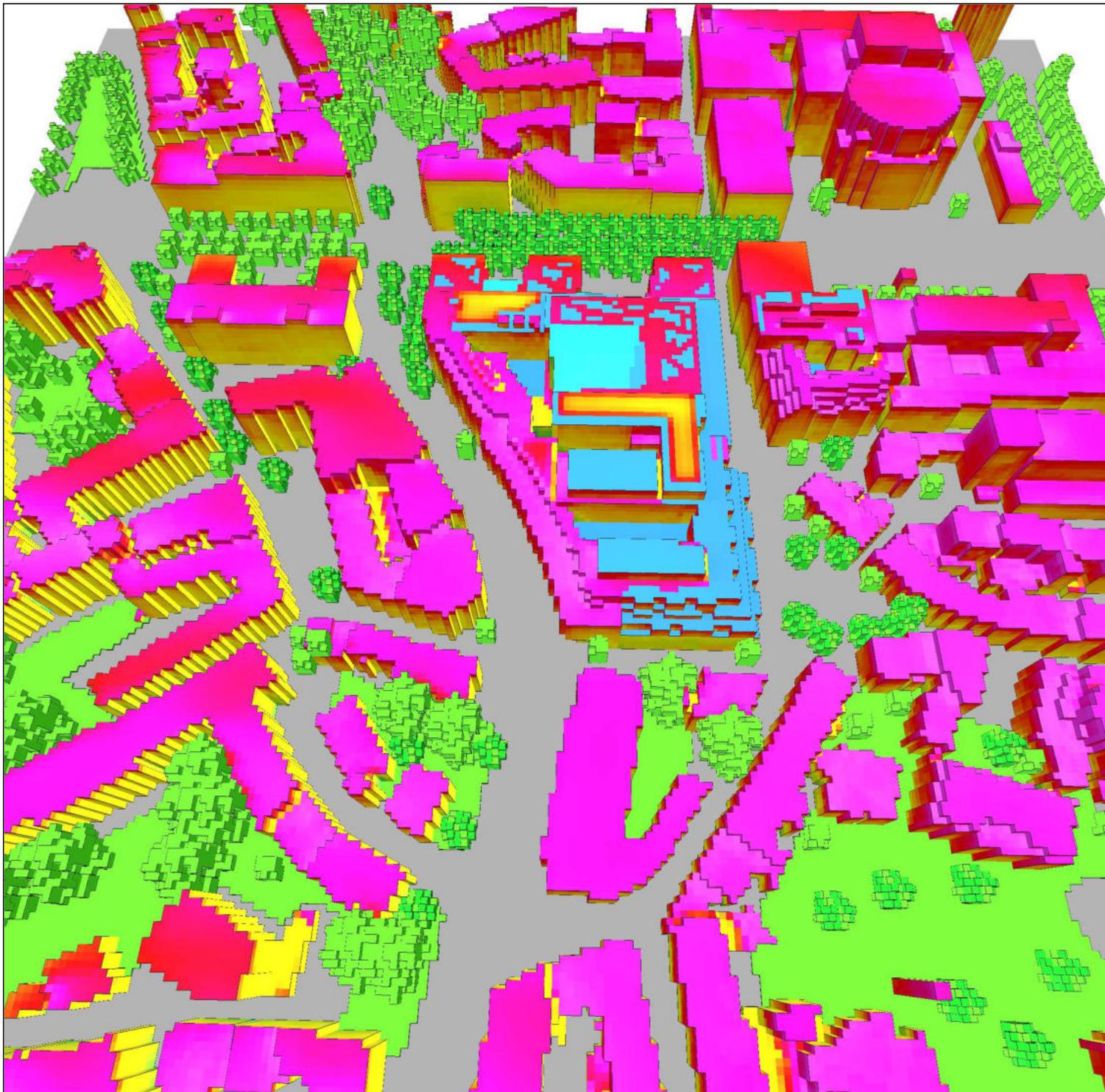


**Wall: Temperature Node 1/  
outside**

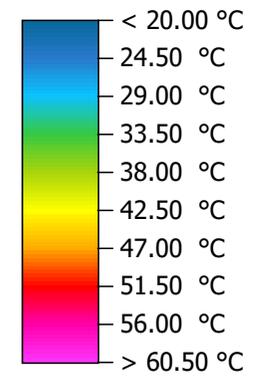


Min: 21.93 °C  
Max: 63.97 °C

Abbildung 6b: Planung  
Extensiv  
Oberflächentemperaturen  
Gebäude 15.00.01 05.07.2018

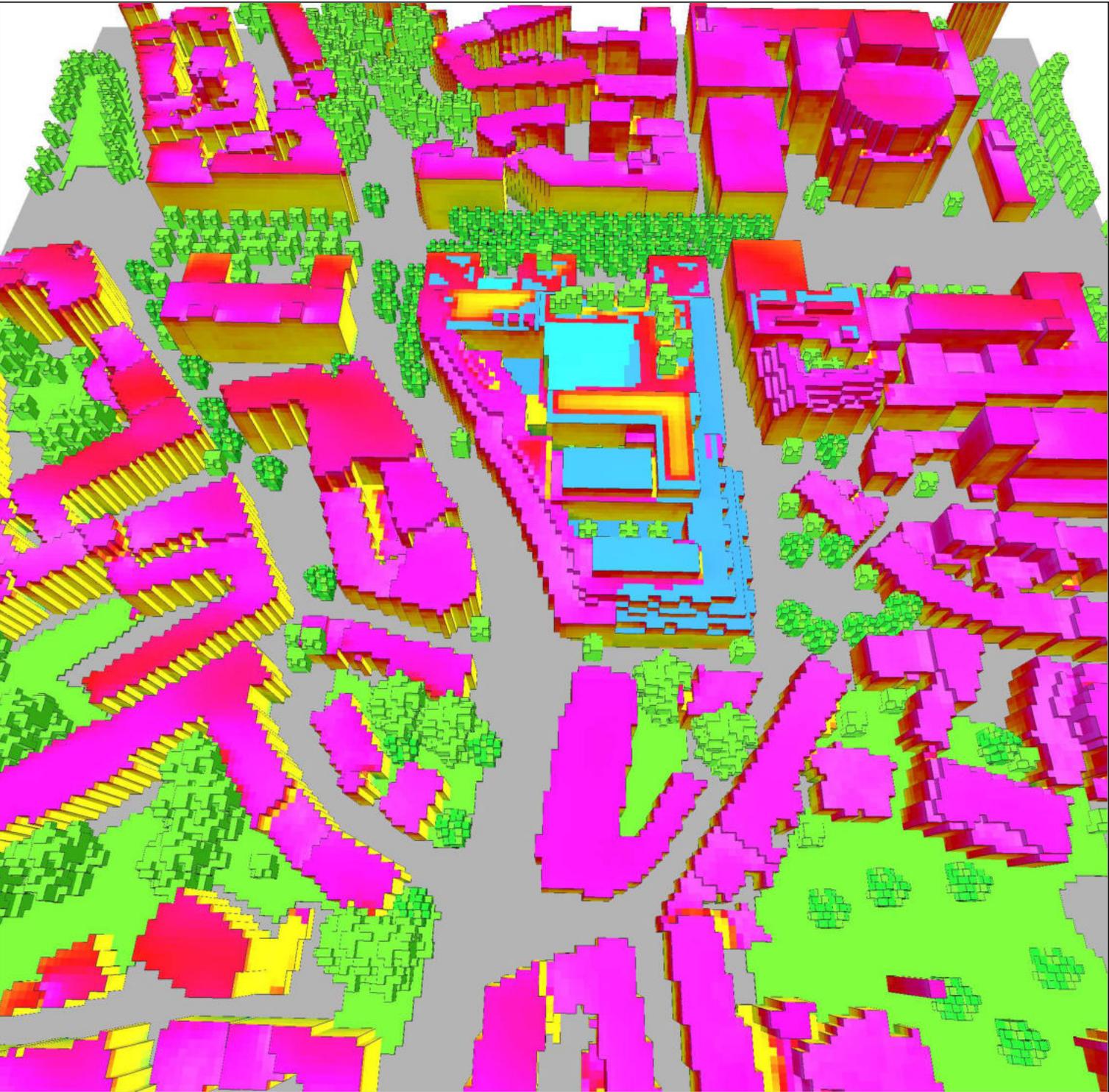


**Wall: Temperature Node 1/  
outside**

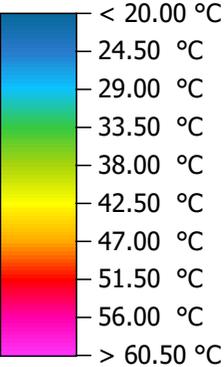


Min: 21.57 °C  
Max: 64.00 °C

Abbildung 6c: Planung Ideal  
Oberflächentemperaturen  
Gebäude 15.00.01 05.07.2018



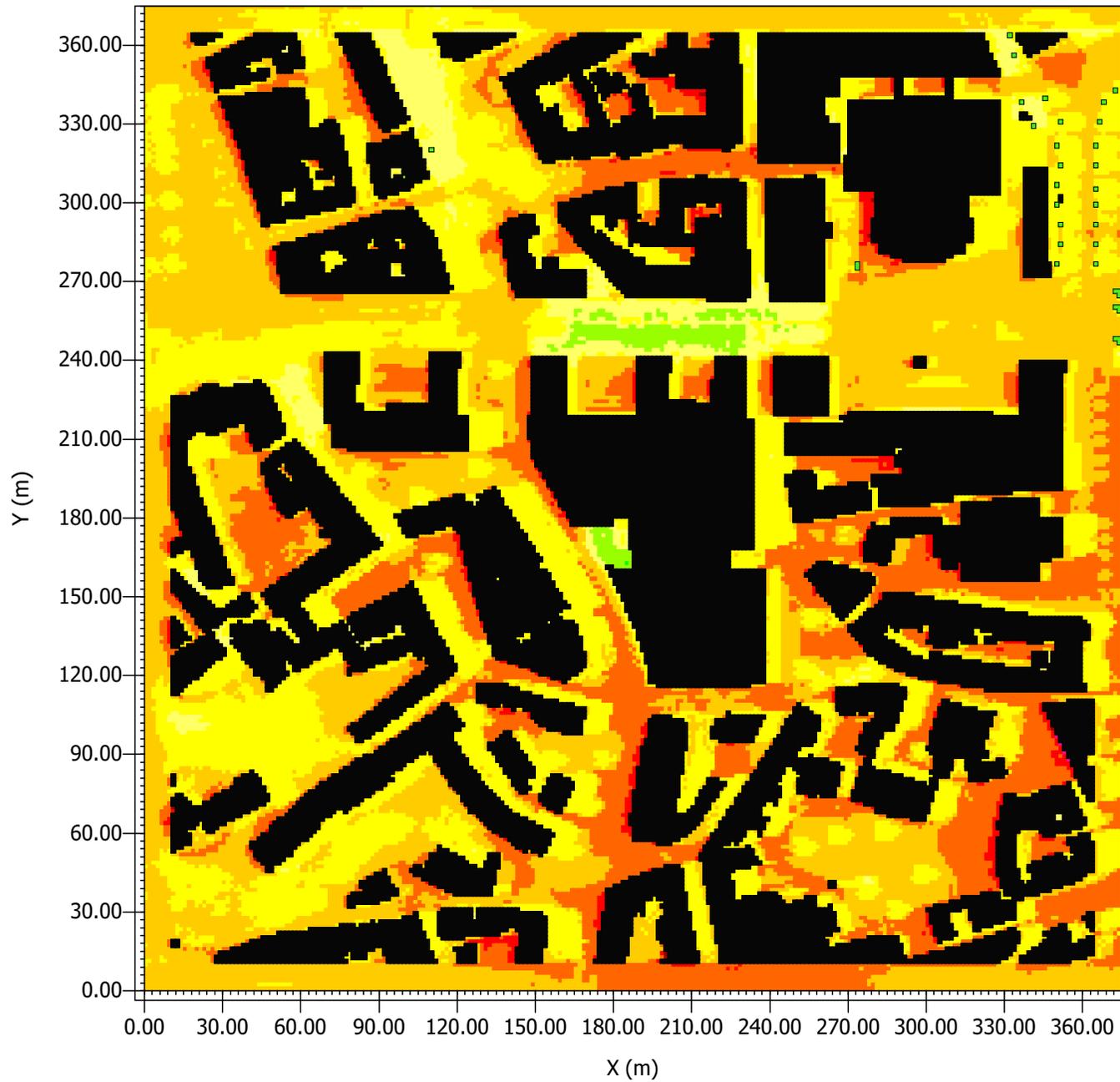
**Wall: Temperature Node 1/  
outside**



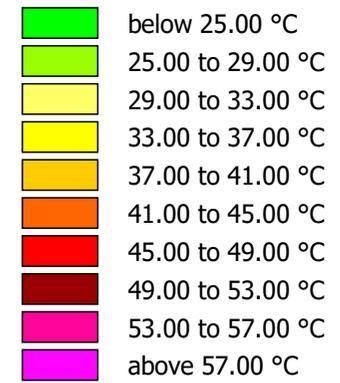
Min: 21.54 °C  
Max: 64.00 °C

Figure 7a: Status-Quo PET  
15:00

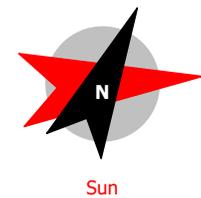
x/y Cut at k=4 (z=1.8000 m)



**PET**



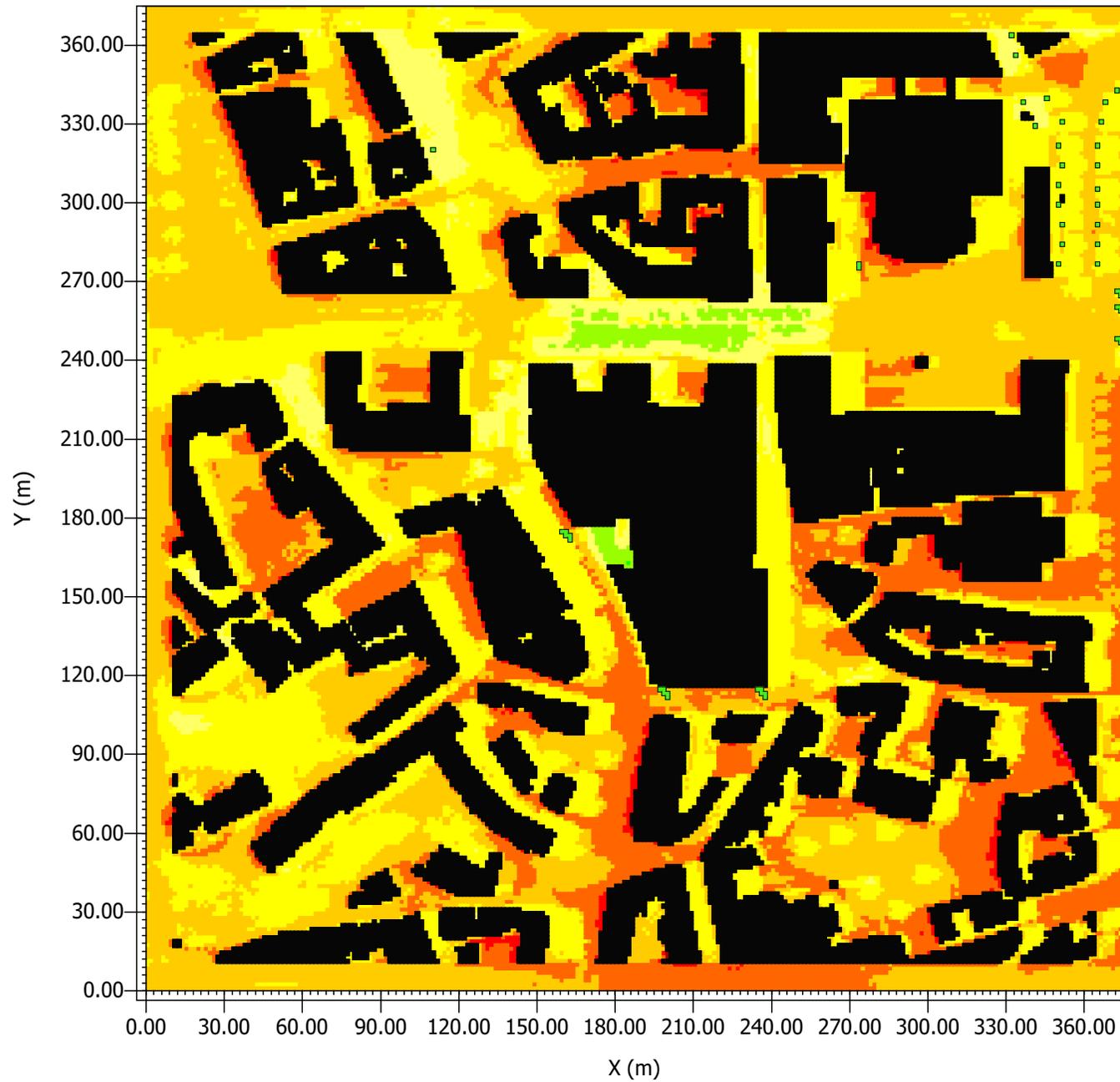
Min: 25.00 °C  
Max: 53.78 °C



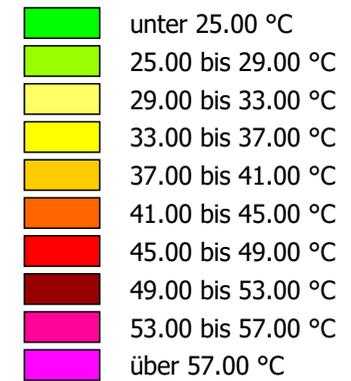
# Abbildung 7b: Planung

## Extensiv, PET 15:00

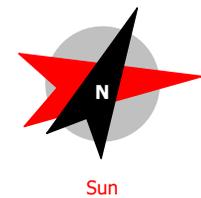
x/y Schnitt bei k=4 (z=1.8000 m)



### PET

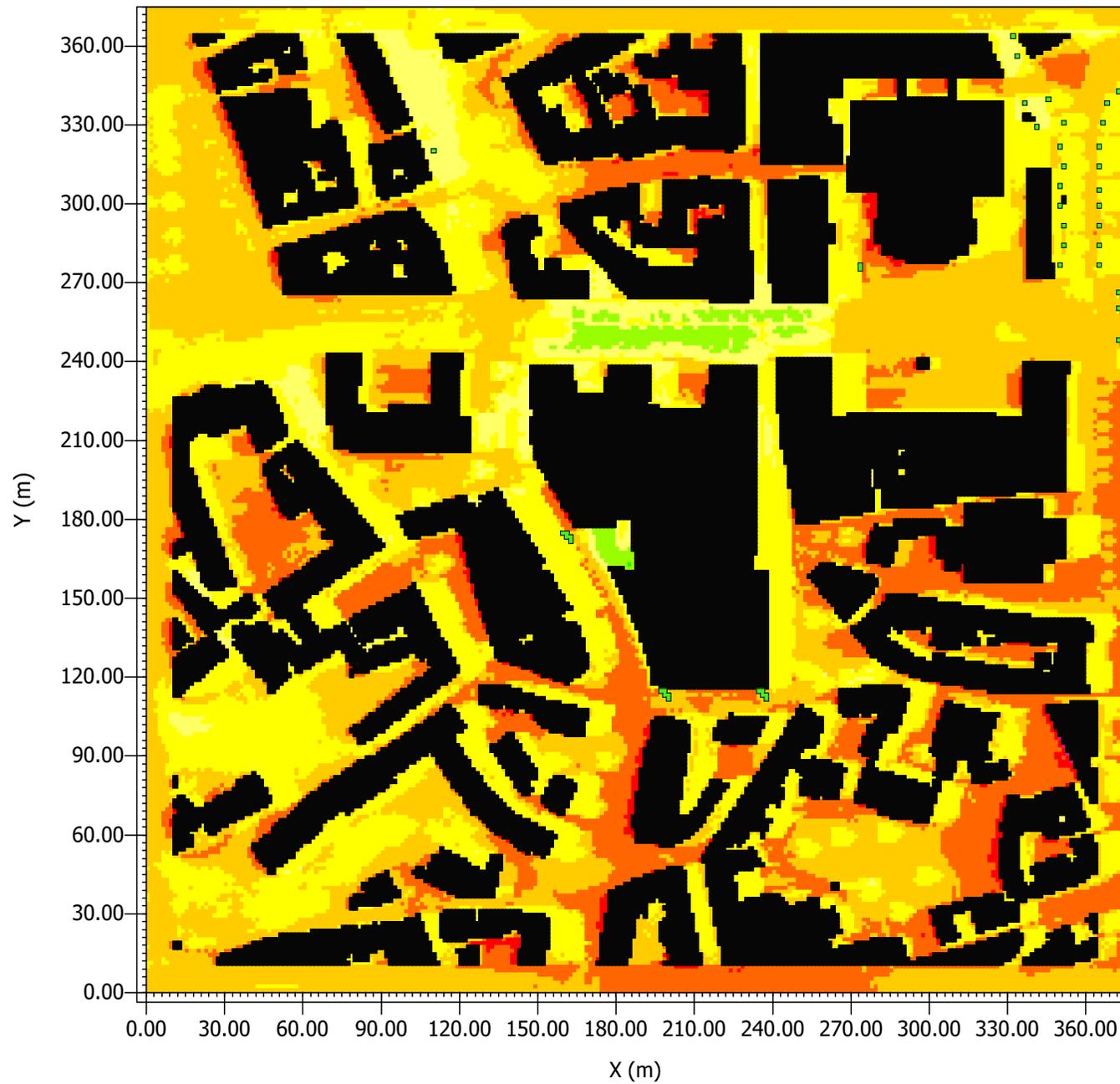


Min: 24.74 °C  
Max: 53.92 °C

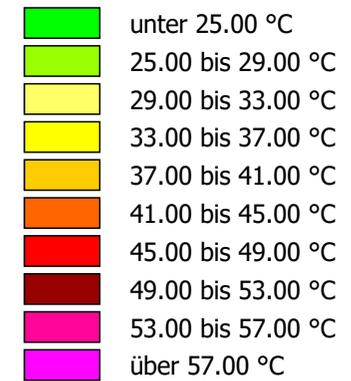


# Abbildung 7c: Planung Ideal, PET 15:00

x/y Schnitt bei k=4 (z=1.8000 m)



## PET



Min: 24.71 °C  
Max: 53.92 °C

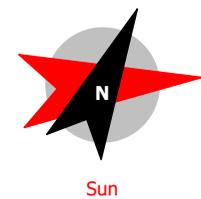
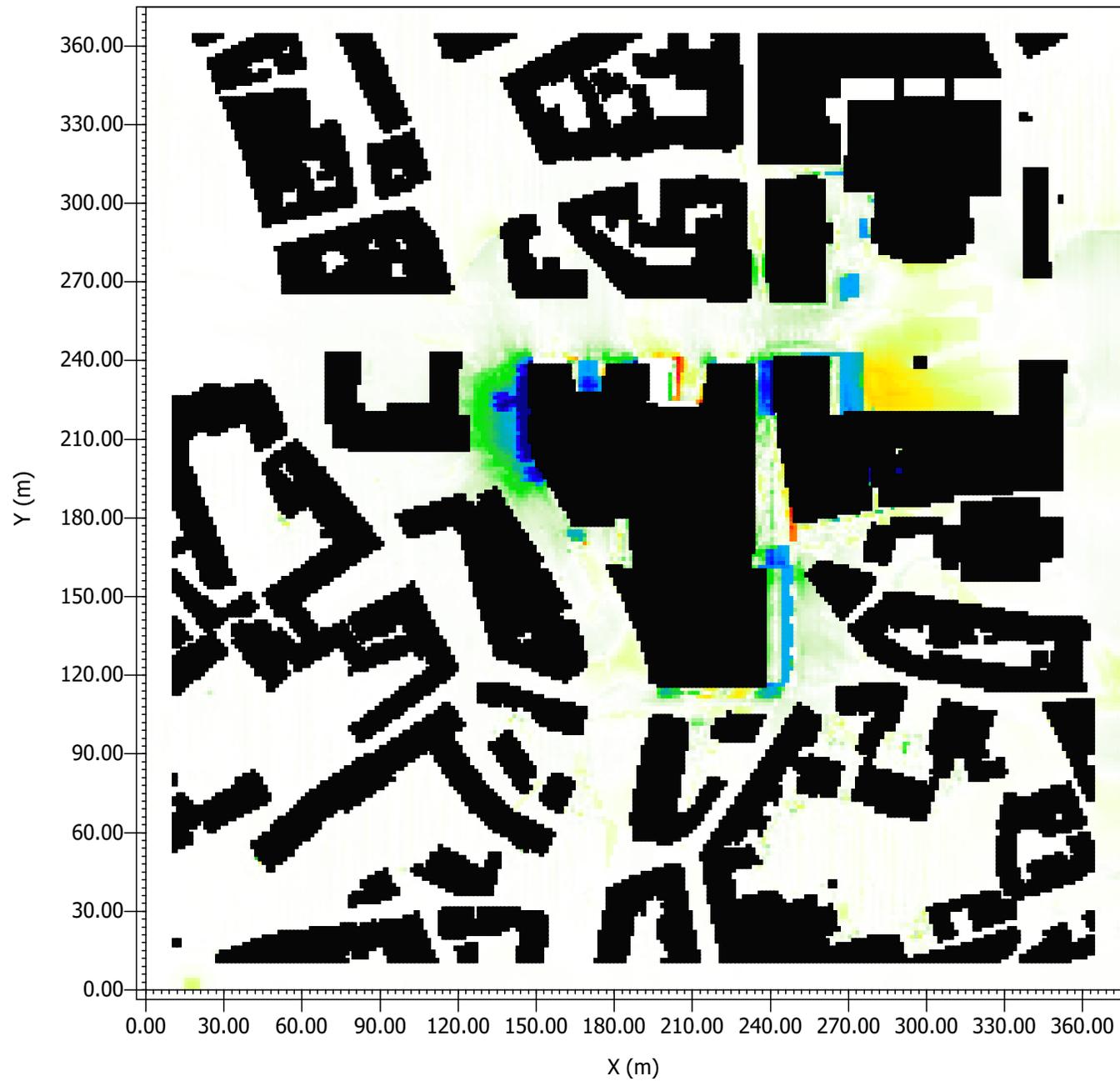


Abbildung 7d: Vergleich  
Status-Quo vs. Planung  
Extensiv, PET 15:00

x/y Schnitt bei k=4 (z=1.8000 m)



**absoluter Unterschied PET**

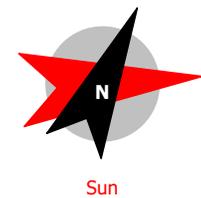
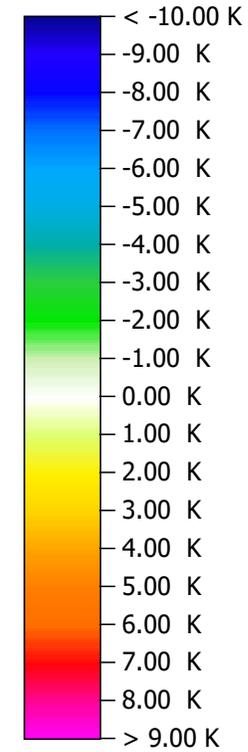
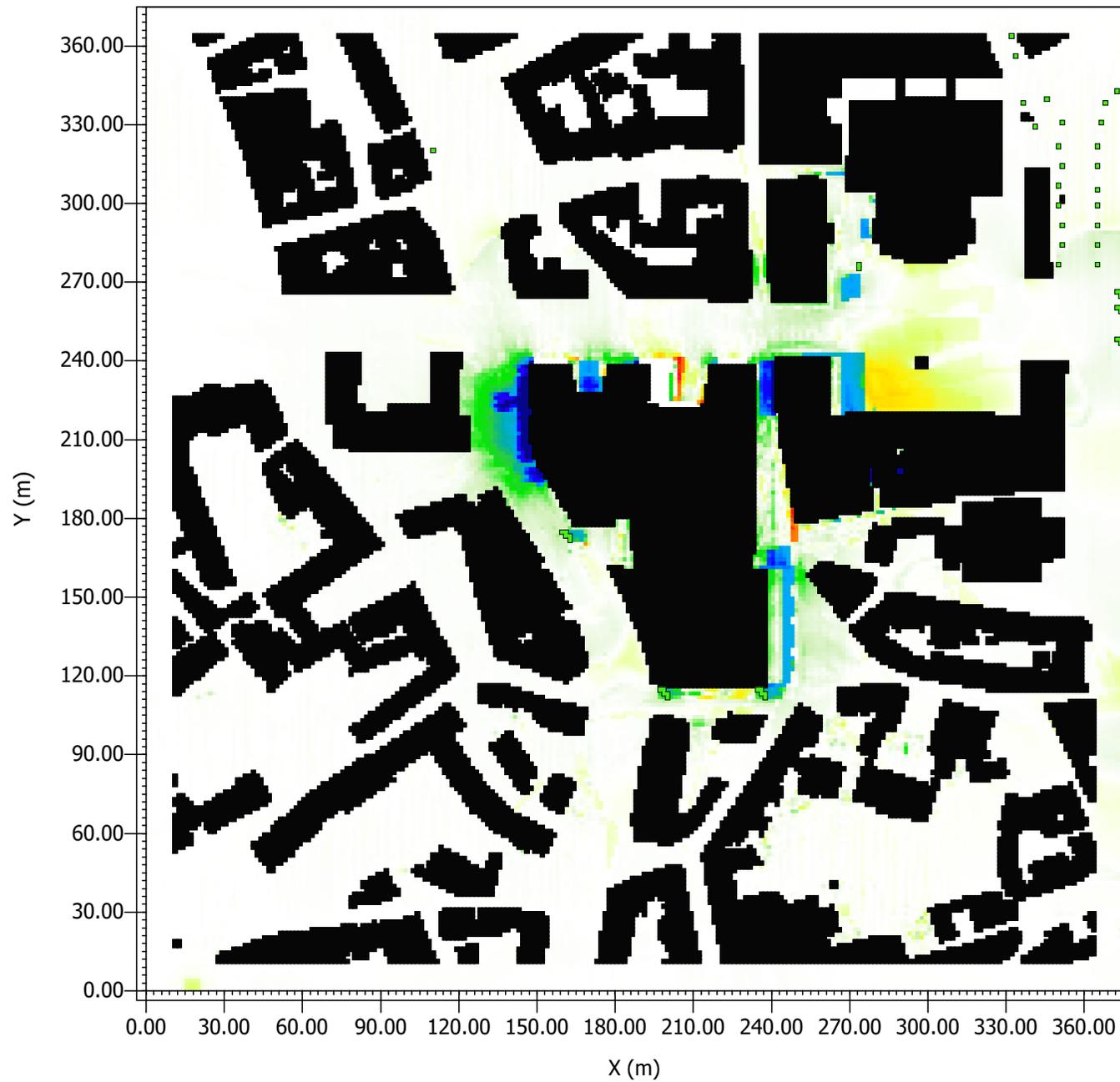


Abbildung 7e: Vergleich  
Status-Quo vs. Planung Ideal,  
PET 15:00

x/y Schnitt bei k=4 (z=1.8000 m)



**absoluter Unterschied PET**

