

BIOKLIMA ANALYSE FÜR DIE PROSUD REGION

- CLIM PROSUD -

ENDBERICHT 2024

AUFTRAGGEBER:

ProSud

G. TAVERNIER

ERSTELLT VON:

GEONET:

E. HIPLER

U. Vogelsberg

N. Krause

C. Burmeister

LIST:

J. JUNK

I. TREBS

C. LETT

Belvaux, Juni 2024



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VII
Glossar	1
Zusammenfassung	3
1. Hintergrund und Anlass	8
2. Fachliche Grundlagen	10
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	10
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse	14
2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik	16
3. Das Klima in Luxemburg	20
3.1 Lufttemperatur	20
3.2 Niederschlag	24
3.3 Autochthone Wetterlagen	27
3.4 Das zukünftige Klima in Luxemburg	30
3.5 Ergebnisse der Sondermessungen	32
4. Analysemethoden	34
4.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D	34
4.2 Aufbereitung der Modelleingangsdaten	41
5. Ergebnisse der numerischen Modellierungen	54
5.1 Nächtliches Temperaturfeld und Kaltluftproduktion	54
5.2 Kaltluftströmungsfeld in der Nacht	57
5.3 Klimaanalysekarten	59
5.4 Wärmebelastung am Tage	62
6. Bewertungen und Planungshinweiskarte	65
6.1 Grundlagen	65
6.2 Geometrische Basis	65
6.3 Bewertungen der Wirk- und der Ausgleichsräume	67
6.4 Planungshinweiskarte	73
6.5 Stadtklimamanagementsystem	81
7. Maßnahmenkatalog Stadtklima	83
10.1 Hinweise zur Wirksamkeit von Maßnahmen	89



Quellenverzeichnis	91
Anhang	96



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 3787, BL.4 (2020))	10
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2023A)	11
ABBILDUNG 3: NÄCHTLICHE INNENRAUMTEMPERATUR (22:00 – 06:00 UHR) IN 500 AUGSBURGER SCHLAFZIMMERN IN DEN SOMMERMONATEN 2019 (BECKMANN, S., HIETE, M. UND BECK, C. 2021)	12
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019)	13
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 - 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019)	13
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017(OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN))	14
ABBILDUNG 7: KLIMADIAGRAMM VON LUXEMBURG FÜR DEN ZEITRAUM 1991 BIS 2020. ES WURDEN DIE DATEN DER METEOLUX-STATION FLUGHAFEN FINDEL VERWENDET (DATENQUELLE: METEOLUX 2021) (<i>DIAGRAMME CLIMATIQUE DU LUXEMBOURG POUR LA PERIODE 1991 A 2020 UTILISANT LES DONNEES DE LA STATION METEOLUX DE L'AEROPORT DE FINDEL (SOURCE DE DONNEES: METEOLUX 2021)</i>)	20
ABBILDUNG 8: JAHRESMITTELWERTE DER LUFTTEMPERATUR FÜR DIE STATION FINDEL (BLAUE LINIE), GLEITENDER 7-JAHRES-DURCHSCHNITT (ROTE LINIE) UND FÜR DIE DREI REFERENZZEITRÄUME 1961 BIS 1990 (8,3 °C), 1981 BIS 2010 (9,3 °C) UND 1991 BIS 2020 (9,9 °C); AUSWERTUNGSZEITRAUM 01/1947 BIS 12/2021. (<i>TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE DE L'AIR POUR LA STATION DU FINDEL (LIGNE BLEUE), MOYENNE MOBILE SUR 7 ANS (LIGNE ROUGE) ET POUR LES TROIS PERIODES DE REFERENCE 1961 A 1990 (8,3 °C), 1981 A 2010 (9,3 °C) ET 1991 D'ICI 2020 (9,9°C); PERIODE D'EVALUATION 01/1947 AU 12/2021</i>)	21
ABBILDUNG 9: MAXIMALE LUFTTEMPERATURWERTE FÜR DIE METEOROLOGISCHEN JAHRESZEITEN (WINTER = DEZEMBER BIS FEBRUAR, FRÜHLING = MÄRZ BIS MAI, SOMMER = JUNI BIS AUGUST, HERBST = SEPTEMBER BIS NOVEMBER) FÜR DIE STATION FINDEL (SCHWARZE LINIEN) UND MITTELWERTE DER DREI REFERENZZEITRÄUME 1961 BIS 1990 (GRAU), 1981 BIS 2010 (GRÜN) UND 1991 BIS 2020 (BLAU). BOXPLOTS AUF DER RECHTEN SEITE DER ABBILDUNG ZEIGEN DIE VERTEILUNG INNERHALB DER DREI REFERENZPERIODEN; BEWERTUNGSZEITRAUM 01/1947 BIS 12/2021. (<i>VALEURS MAXIMALES DE TEMPERATURE DE L'AIR POUR LES SAISONS METEOROLOGIQUES (HIVER = DECEMBRE A FEVRIER, PRINTEMPS = MARS A MAI, ETE = JUIN A AOUT, AUTOMNE = SEPTEMBRE A NOVEMBRE) POUR LA STATION DU FINDEL (LIGNES NOIRES) ET VALEURS MOYENNES DE LA TROIS PERIODES DE REFERENCE 1961 A 1990 (GRIS), 1981 A 2010 (VERT) ET 1991 A 2020 (BLEU). LES BOITES A MOUSTACHES SUR LE COTE DROIT DE LA FIGURE MONTRENT LA REPARTITION AU SEIN DES TROIS PERIODES DE REFERENCE ; PERIODE DE COTISATION 01/1947 AU 12/2021</i>)	22
ABBILDUNG 10: ABSOLUTE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER STÜNDLICHEN LUFTTEMPERATURWERTE, DIE AN DER FLUGHAFENSTATION FINDEL FÜR ZWEI REFERENZPERIODEN VON 30 JAHREN GEMESSEN WURDEN (1961-1991: GRAU, 1991-2020 ROT); KLASSENGRÖÖE = 1 °C. (<i>DISTRIBUTION STATISTIQUE DES VALEURS HORAIRES DE TEMPERATURE DE L'AIR MESUREES A LA STATION AEROPORTUAIRE DU FINDEL PENDANT DEUX PERIODES DE REFERENCE DE 30 ANS (1961-1991 : GRIS, 1991-2020 ROUGE) ; TAILLE DES CLASSES = 1°C.</i>)	23
ABBILDUNG 11: MONATLICHE MITTLERE LUFTTEMPERATURWERTE (TAS; TEMPERATUR LUFTOBERFLÄCHE) FÜR DIE REFERENZZEITRÄUME 1961 BIS 1990 (LINKS) UND 1991 BIS 2020 (RECHTS). EVALUATIONSZEITRAUM 01/1961 BIS 12/2020. QUELLE: JUNK ET AL. JAHRESBERICHT CHAPEL-PROJEKT, 2023. (<i>VALEURS MENSUELLES MOYENNES DE LA TEMPERATURE DE L'AIR (TAS ; TEMPERATURE DE LA SURFACE DE L'AIR) POUR LES PERIODES DE REFERENCE 1961 A 1990 (A GAUCHE) ET 1991 A 2020 (A DROITE). PERIODE D'EVALUATION 01/1961 AU 12/2020. SOURCE : JUNK ET AL., RAPPORT ANNUEL DU PROJET CHAPEL, 2023</i>)	23



ABBILDUNG 12: JAHRESNIEDERSCHLAGSWERTE FÜR DIE STATION FINDEL; AUSWERTUNGSZEITRAUM 01/1947 BIS 12/2021. (VALEURS ANNUELLES DES PRECIPITATIONS POUR LA STATION DU FINDEL ; PERIODE D'EVALUATION 01/1947 AU 12/2021).....	24
ABBILDUNG 13: NIEDERSCHLAGSSUMMEN FÜR DIE METEOROLOGISCHEN JAHRESZEITEN (WINTER = DEZEMBER BIS FEBRUAR, FRÜHLING = MÄRZ BIS MAI, SOMMER = JUNI BIS AUGUST, HERBST = SEPTEMBER BIS NOVEMBER) FÜR DIE STATION FINDEL UND MITTELWERTE DER DREI REFERENZPERIODEN 1961 BIS 1990 (GRAU), 1981 BIS 2010 (GRÜN) UND 1991 BIS 2020 (BLAU). BOXPLOTS AUF DER RECHTEN SEITE DER ABBILDUNG ZEIGEN DIE VERTEILUNG INNERHALB DER DREI REFERENZPERIODEN; AUSWERTEZEITRAUM 01/1947 BIS 12/2021. (TOTALS DE PRECIPITATIONS POUR LES SAISONS METEOROLOGIQUES (HIVER = DECEMBRE A FEVRIER, PRINTEMPS = MARS A MAI, ETE = JUIN A AOUT, AUTOMNE = SEPTEMBRE A NOVEMBRE) POUR LA STATION DU FINDEL ET VALEURS MOYENNES POUR LES TROIS PERIODES DE REFERENCE 1961 A 1990 (GRIS), 1981 A 2010 (VERT) ET 1991 A 2020 (BLEU). LES BOITES A MOUSTACHES SUR LE COTE DROIT DE LA FIGURE MONTRENT LA REPARTITION AU SEIN DES TROIS PERIODES DE REFERENCE; PERIODE D'EVALUATION 01/1947 AU 12/2021).....	25
ABBILDUNG 14: ABSOLUTE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER STÜNDLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN, GEMESSEN AN DER FLUGHAFENSTATION FINDEL FÜR ZWEI 30-JÄHRIGE REFERENZZEITRÄUME (1961-1991:BLAU, 1991-2020 ROT); KLASSENGRÖßE = 1 MM. (DISTRIBUTION DE FREQUENCE ABSOLUE DES CUMULS HORAIRES DE PRECIPITATIONS, MESURES A LA STATION AEROPORTUAIRE DU FINDEL SUR DEUX PERIODES DE REFERENCE DE 30 ANS (1961-1991: BLEU, 1991-2020 ROUGE); TAILLE DE LA CLASSE = 1 MM)	26
ABBILDUNG 15: MONATSMITTELWERTE (NIEDERSCHLAG) FÜR DIE REFERENZZEITRÄUME 1961 BIS 1990 (LINKS) UND 1991 BIS 2020 (RECHTS). AUSWERTEZEITRAUM 01/1961 BIS 12/2020. (VALEURS MOYENNES MENSUELLES (PRECIPITATIONS) POUR LES PERIODES DE REFERENCE 1961 A 1990 (A GAUCHE) ET 1991 A 2020 (A DROITE). PERIODE D'EVALUATION 01/1961 AU 12/2020).....	26
ABBILDUNG 16: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN LUXEMBURG 2005 – 2019; STATION: LUXEMBURG, FLUGHAFEN FINDEL (DATENQUELLE: METEOLUX 2020) (DISTRIBUTION DE LA DIRECTION DU VENT AU LUXEMBOURG 2005 - 2019; STATION: LUXEMBOURG, AÉROPORT DE FINDEL (SOURCE DE DONNÉES: METEOLUX 2020)).....	27
ABBILDUNG 17: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN AUTOCHTHONEN NÄCHTEN (28,2 PRO JAHR) AN DER STATION LUXEMBURG, FLUGHAFEN FINDEL (2005-2019) (NOMBRE MENSUEL MOYEN DE NUITS AUTOCHTONES À LONG TERME (28,2 PAR AN) À LA STATION DE LUXEMBOURG, AÉROPORT DE FINDEL (2005-2019)).....	28
ABBILDUNG 18: TAGESGANG DER LUFTTEMPERATUR UND WINDGESCHWINDIGKEIT AN EINEM MITTLEREN (AUTOCHTHONEN) SOMMERTAG: BEISPIEL DES 6./7. AUGUST 2013, GEMESSEN AN DER STATION LUXEMBURG, FLUGHAFEN FINDEL (VARIATION DIURNE DE LA TEMPERATURE DE L'AIR ET DE LA VITESSE DU VENT LORS D'UNE JOURNEE MOYENNE (AUTOCHTONE) D'ETE: EXEMPLE DES 6/7 AOUT 2013, MESUREE A LA STATION LUXEMBOURG, AEROPORT DE FINDEL)	29
ABBILDUNG 19: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG UM 4 UHR NACHTS WÄHREND AUTOCHTHONER WETTERLAGEN IM SOMMER 2005 – 2019; STATION: LUXEMBURG, FLUGHAFEN FINDEL (DATENQUELLE: METEOLUX 2020) (DISTRIBUTION DE LA DIRECTION DU VENT À 4 HEURES DU MATIN PENDANT LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES AUTOCHTONES EN ÉTÉ 2005 - 2019; STATION: LUXEMBOURG, AÉROPORT DE FINDEL (SOURCE DE DONNÉES: METEOLUX 2020))	30
ABBILDUNG 20: GLOBALER ANTHROPOGENER STRAHLUNGSANTRIEB FÜR VERSCHIEDENE EMISSIONSSZENARIEN (RCP85, RCP6, RCP45, RCP3-PD), (IPCC, AR4).	30
ABBILDUNG 21: LINKE SEITE JEDER ABBILDUNG: ZEITREIHE DES MULTI-MODELL-ENSEMBLES DER MAXIMALEN JÄHRLICHEN (A), MINIMALEN JÄHRLICHEN (B) UND MITTLEREN JÄHRLICHEN LUFTTEMPERATUR (C) FÜR DEN RCP45. DIE STREUUNG (GRAU SCHATTIERTER BEREICH) WIRD ÜBER +/- EINE STANDARDABWEICHUNG DES ENSEMBLES DEFINIERT. ZUSÄTZLICH WERDEN DIE MITTELWERTE DER 30-JAHRES-ZEITSCHLEIBE (REFERENZZEITRAUM (REF) 1971-1990, NAHE ZUKUNFT (NF) 2021-2050 UND FERNE ZUKUNFT (FF) 2070-2099) ALS ROTE LINIEN DARGESTELLT. RECHTE SEITE DER ABBILDUNG: BOXPLOTS DER TAGESWERTE VON FÜR REF, NF UND FF. DIE WHISKER ERSTRECKEN SICH BIS ZUM 1,5-FACHEN INTERQUARTILSBEREICH. DATEN AUßERHALB WERDEN ALS EINZELNE ROTE PUNKTE DARGESTELLT.	31



ABBILDUNG 22: OBERES BILD: MAXIMALE DIFFERENZ DER TAGESMITTELWERTE UND MAXIMALE DIFFERENZ DER STÜNDLICHEN WERTE DER GEMESSENEN LUFTTEMPERATUR, UNTERES BILD: STÜNDLICHE MITTELWERTE DER LUFTTEMPERATUR FÜR DIE ZWEI SONDERMESSSTATIONEN IN ESCH-ZUR-ALZETTE (ELLERGRONN (RURAL) UND STADTMITTE GEGENÜBER BAHNHOF, BD JOHN FITZGERALD KENNEDY) FÜR DEN ZEITRAUM VON 26.6.2023 BIS 22.05.2024. SCHATTIERTE FLÄCHEN IN DER UNTEREN ABBILDUNG ZEIGEN STÜNDLICHE MINIMAL- UND MAXIMALWERTE.....	32
ABBILDUNG 23: ERGEBNISSE EINER NÄCHTLICHEN PROFILMESSFAHRT IN ESCH-ZUR-ALZETTE AM 1. FEBRUAR 2024 (22:12 – 22:41 UHR) MIT START- UND ENDPUNKT ELLERGRONN. DIE TEMPERATURSKALA ZEIGT GEMESSENE LUFTTEMPERATUREN (TEMP1) IM BEREICH VON 0.37 °C UND 4.4 °C.....	33
ABBILDUNG 24: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN ('TSURF') FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D.....	36
ABBILDUNG 25: IDEALISIERTER TAGESGANG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR ('TSURF') SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR ('T2M') VON BZW. ÜBER ASPHALT SOWIE VON BZW. ÜBER EINEM FEUCHTEN UND EINEM TROCKENEN GRASBEWACHSENEN BODEN WÄHREND EINES HOCHSOMMERLICHEN STRALUNGSTAGES.....	38
ABBILDUNG 26: DER SZENARIO-TRICHTER (QUELLE: BUSINESS WISSEN 2023)	39
ABBILDUNG 27: MODELLGEBIET UNTERTEILT IN VIER SICH ÜBERLAPPENDEN KACHELN (KACHEL 1 IST HERVORGEHOBEN)	41
ABBILDUNG 28: GELÄNDEHÖHEN IN DER REGION PRO-SUD	43
ABBILDUNG 29: AUSSCHNITT DES NUTZUNGSRASTERS IM 5 M RASTER.	44
ABBILDUNG 30: EINARBEITUNG DER SIEDLUNGSENTWICKLUNGSFLÄCHEN MIT PLANUNTERLAGEN UND RAUM-PLUS-FLÄCHEN. LINKS = IST-NUTZUNGSRASTER, RECHTS = ZUKUNFTS-NUTZUNGSRASTER.	46
ABBILDUNG 31: ANTEILE DER NUTZUNGSKLASSEN IM IST- UND ZUKUNFTSNUTZUNGSRASTER. EINIGE KLASSEN ZEIGEN AUFGRUND IHRER SELTENEN VERWENDUNG EINEN ANTEIL VON 0,0 %. DIES IST BEGRÜNNET DURCH RUNDUNGSEFFEKTE.....	47
ABBILDUNG 32: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROß 1992)	48
ABBILDUNG 33: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IN EINEM AUSSCHNITT VON ESCH-SUR-ALZETTE. OBEN: IST-SITUATION, MITTE: ZUKUNFTSSZENARIO „SCHWACHER KLIMAWANDEL“, UNTEN: ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“.....	55
ABBILDUNG 34: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE IN EINEM AUSSCHNITT VON ESCH-SUR-ALZETTE, IST-SITUATION.....	56
ABBILDUNG 35: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM UMFELD VON ESCH-SUR-ALZETTE, IST-SITUATION.....	57
ABBILDUNG 36: AUSSCHNITT AUS DEM BODENNAHEN NÄCHTLICHEN STRÖMUNGSFELD MIT DEM BOULEVARD PRICE HENRI ZENTRAL IN DER ABBILDUNG.....	58
ABBILDUNG 37: LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTEN.....	59
ABBILDUNG 38: AUSSCHNITT AUS DER KLIMAANALYSEKARTE FÜR DIE IST-SITUATION (LEGENDE: SIEHE ABBILDUNG 37).....	62
ABBILDUNG 39: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IN DER KERNSTADT VON ESCH-SUR-ALZETTE UND UMGEBUNG. OBEN: IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO „SCHWACHER KLIMAWANDEL“, UNTEN RECHTS: ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“.....	63
ABBILDUNG 40: LINKS DAS AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE	66
ABBILDUNG 41: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008)	67
ABBILDUNG 42: SCHEMA DER STADTKLIMATISCHEN BEWERTUNG VON FLÄCHEN IM AUSGLEICHSPUNKT IN DER NACHT (SCHÉMA D'ÉVALUATION DE L'IMPORTANCE DES ESPACES VERTS POUR LA SITUATION NOCTURNE)	70
ABBILDUNG 43: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA. VERKÜRZTE LEGENDE (CARTE INDICATIVE DE PLANIFICATION POUR UNE PARTIE DU PAYS (LEGENDE RACCOURCIE))	76



ABBILDUNG 44: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER BEWERTUNG DER STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN 80

ABBILDUNG 45: VERÄNDERUNGEN DURCH ANPASSUNGSMAßNAHMEN AM BEISPIEL EINES TAGESVERLAUFS DER AUßENTEMPERATUR IN ZWEI METERN HÖHE (CHANGEMENTS DUS AUX MESURES D'ADAPTATION EN UTILISANT L'EXEMPLE D'UNE VARIATION DIURNE DE LA TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE À UNE HAUTEUR DE DEUX MÈTRES).. 89

ABBILDUNG 46: BLAU-GRÜNE STRAßENRAUMGESTALTUNG IST BIOKLIMATISCH WIRKSAMER ALS DACHBEGRÜNUNG (COUTTS ET AL. 2014) (*L'AMENAGEMENT BLEU-VERT DE L'ESPACE ROUTIER EST PLUS EFFICACE SUR LE PLAN BIOCLIMATIQUE QUE LES TOITS VEGETALISES (COUTTS ET AL. 2014)*)..... 90



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG 2022, 18).....	17
TABELLE 2: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN...	19
TABELLE 3: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODEL LAUFLÖSUNG VON 5-10 M.	35
TABELLE 4: ENTWICKELTE SZENARIEN UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE.....	40
TABELLE 5: DATENQUELLEN ZUR ERSTELLUNG DER EINGANGSDATEN.....	42
TABELLE 6: STANDARDWERTE FÜR GRZ UND VSG FÜR VERSCHIEDENE FLÄCHENNUTZUNGEN UND DIE DARAUS BERECHNETEN ANTEILE FÜR NUTZUNGSKLASSEN + GEBÄUDEHÖHE	45
TABELLE 7: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.	49
TABELLE 8: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT	50
TABELLE 9: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN.	61
TABELLE 10: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	68
TABELLE 11: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE LUFTTEMPERATUREN FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION IN DER NACHT	69
TABELLE 12: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	71
TABELLE 13: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	72
TABELLE 14: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE WOHNSIEDLUNG IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	72
TABELLE 15: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG AM TAGE, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	73
TABELLE 16: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE POTENZIELLE ERHOLUNGSFUNKTION AM TAGE, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	73
TABELLE 17: KOMBINIERT E BEWERTUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AUS DEN EINZELNEN BEWERTUNGEN NACHT UND TAG IN WOHNGEBIETEN SOWIE IN UNBEWOHNTE N GEBIETEN.....	74
TABELLE 18: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES WIRKRAUMS.....	75
TABELLE 19: MIT DEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN STADTKLIMA IM WIRKRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	76
TABELLE 20: KOMBINIERT E BEWERTUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEWERTUNG AUS DEN EINZELNEN BEWERTUNGEN NACHT UND TAG FÜR DIE FLÄCHEN IM AUSGLEICHSRAUM.....	77
TABELLE 21: METHODISCHE HERLEITUNG DES STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHSRAUMS.	77
TABELLE 22: MIT DEM STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	78
TABELLE 23: ABGESTUFTE BEWERTUNG DER STADTKLIMATISCHEN VERTRÄGLICHKEIT DER STÄDTEBAULICHEN ERWEITERUNGSFLÄCHEN	80
TABELLE 24: EMPFEHLUNGEN RAUMEINHEITENSPEZIFISCHER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR LUXEMBURG (MAßNAHMENKATALOG) (RECOMMANDATIONS POUR DES MESURES SPECIFIQUES A L'UNITE SPATIALE ET EFFICACES POUR LE CLIMAT URBAIN AU LUXEMBOURG (CATALOGUE DE MESURES).....	85



Glossar

- Albedo:** Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.
- Allochthone Wetterlage:** Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert. Die allochthone Wetterlage ist das Gegenstück zur \rightarrow *autochthonen Wetterlage*.
- Ausgleichsraum:** Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen \rightarrow *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über \rightarrow *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Wärmebelastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.
- Austauscharme Wetterlage:** \rightarrow *Autochthone Wetterlage*
- Autochthone Wetterlage:** Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können. In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagernde Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld, das entsprechend sensibel auf Hindernisse reagiert. Tagsüber sind die Verhältnisse weniger stabil.
- Bioklima:** Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).
- Flurwind:** Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).
- Grünfläche:** Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.
- Kaltluft:** Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).
- Kaltlufteinwirkungsbereich:** Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungs- und Verkehrsflächen, die von einem überdurchschnittlich hohen \rightarrow *Kaltluftvolumenstrom* durchflossen werden oder bodennahe Windgeschwindigkeiten von mindestens 0,1 m/s aufweisen.
- Kaltluftleitbahnen:** Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (\rightarrow *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (\rightarrow *Wirkungsräume*) miteinander und sind mit ihren hohen \rightarrow *Kaltluftvolumenströmen* elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, mindestens jedoch 50 m breit (Mayer et al. 1994) und zum belasteten Siedlungsraum ausgerichtet.
- Kaltluftvolumenstrom:** Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der \rightarrow *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m^3/s). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an \rightarrow *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise



eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fließt. Der in dieser Arbeit modellierte Kaltluftvolumenstrom bezieht sich auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ verwendet. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

Klimaanalysekarte: Analytische Darstellung der Klimaauswirkungen und Effekte in der Nacht sowie am Tag im Stadtgebiet und dem näheren Umland (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).

NEWA (New European Windatlas): Im Neuen Europäischen Windatlas wurden mithilfe eines Wettermodells die Windverhältnisse der zurückliegenden 30 Jahre über ganz Europa mit einer Auflösung von drei Kilometern nachsimuliert. Der Atlas liefert für jeden Punkt in der EU Informationen über das langjährige Windklima. Er stellt unter anderem interaktive Karten, Zeitreihen sowie Statistiken von Windgeschwindigkeit und anderen windenergierelevanten Parametern in verschiedenen Höhen bereit.

PET (Physiological Equivalent Temperature / Physiologisch äquivalente Temperatur): Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

Planungshinweiskarte: Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen im Stadtgebiet (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathway): Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die RCP-Szenarien lösen im fünften Sachstandsbericht des „Weltklimarats“ der Vereinten Nationen (IPCC) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien ab. Die Zahl in der Bezeichnung RCP 2.6 („Klimaschutz-Szenario“), RCP 4.5 bzw. RCP 8.5 („Weiter wie bisher-Szenario“) gibt den zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m^2 bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts an.

Städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

Strömungsfeld: Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der Winde in 2 m über Grund während einer → *autochthonen Wetterlage*.

Synoptischer Wind: Großräumige, in der Regel über längere Zeiträume anhaltende Winde (z.B. Rheintalwind), die das Klima einer Region prägen. Synoptische Winde entstehen nur bei bestimmten Wetterlagen und grenzen sich von tagesperiodischen Winden ab, welche sich aller 24 Stunden mehr oder weniger intensiv wiederholen (z.B. Flurwinde).

Wirkungsraum: Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Wohn- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische Belastung auftreten kann.

z-Transformation: Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschließend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.



Zusammenfassung

Mit voranschreitender Klimaveränderung werden Tage und Nächte mit großer Hitzebelastung in Zukunft immer häufiger und extremer. Insbesondere im Siedlungsraum tragen eine in dichter Bebauung eingeschränkte Windzirkulation, sowie die Absorption der einfallenden Sonnenstrahlung durch die vielen versiegelten Flächen in Kombination mit der Abwärme von Industrie, Gebäuden und Verkehr zum Wärmeinsel-Effekt bei. Tagsüber heizen sich Siedlungen stärker auf und nachts kühlen sie deutlich langsamer ab als das Umland.

Die Hitzebelastung im Siedlungsraum ist eine Herausforderung, welche in der Raumplanung miteinbezogen werden muss. Die Raumentwicklung erfordert jedoch genaue Kenntnisse über die lokalen Klimabedingungen. Vor diesem Hintergrund wurde die vorliegende regionale Stadtklimaanalyse flächendeckend und hochaufgelöst für die Region Pro Sud mit ihren 11 Gemeinden erstellt. Die Modellergebnisse und die daraus resultierenden Karten (Klimaanalysekarten und Planungshinweiskarte) geben Aufschluss über die klimatische Situation in den Siedlungsgebieten der Region, und die Ausgleichsfunktion der Grün- und Freiflächen. Sie sollen als Beurteilungsgrundlage für zukünftige baurechtliche Planungen dienen.

Das Hauptprodukt des über 1-jährigen Arbeitsprozesses ist eine Planungshinweiskarte mit angebindenem Maßnahmenkatalog. Das Kartenwerk macht zum einen die abgestufte Handlungspriorität zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkraum“) in der Region Pro Sud sichtbar. Zum anderen wird aber auch sämtlichen Grün- und Freiflächen („Ausgleichsraum“) ein Schutzbedarf auf Grundlage der von ihnen bereitgestellten klimaökologischen Funktionen zugewiesen. Der Entwicklung der Planungshinweiskarte vorangestellt sind Bewertungen jeder Teilfläche, in denen jeweils die Tag- und die Nachtsituation, für den Status Quo („Ist-Situation“) sowie beide Zukunftsszenarien getrennt betrachtet wurden. Siedlungsflächen wurden je nach bioklimatischer Belastung (basierend auf der Lufttemperatur in der Nacht bzw. PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur)) am Tage klassifiziert. Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) wurden am Tage nach ihrer Bedeutung als Erholungsraum (basierend auf der PET), und in der Nacht auf Basis ihrer Funktion als Kaltluftaustauschflächen bewertet. Die Ergebnisse liegen als umfangreicher Geodatensatz vor.

Grundlagen der Modellierung

Um Informationen zum Stadtklima in der Region Pro Sud zu gewinnen, wurde eine Modellrechnung mit dem Stadtklimamodell FITNAH-3D durchgeführt, um flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Untersuchungsgebiet bereitzustellen. Die horizontale Auflösung der Modellierung beträgt 5 m, d.h. das Gebiet Region Pro Sud und ihrer 11 Gemeinden wird in ein Raster mit einer Gitterweite von 5 m x 5 m zerlegt. Für jede Rasterzelle werden Informationen bspw. zur Geländehöhe und Landnutzung, zu Gebäudeumrissen und -höhen sowie zu Bäumen und dem Versiegelungsanteil bestimmt und als Eingangsdaten für die Modellrechnung verwendet. Das gewählte Untersuchungsgebiet geht mit einer Fläche von ca. 31 km x 25 km über die Regionsgrenze hinaus, damit die im Umland gelegenen Höhen- und Landnutzungsunterschiede mit Einfluss auf das Stadtklima berücksichtigt werden. Dabei liegt der Modellierung eine sommerliche Hochdruckwetterlage mit wolkenlosem Himmel und einem sehr schwachen übergelagerten Wind zugrunde (Tageshöchsttemperatur > 25 °C), die in der Stadtklimatologie typischerweise verwendet wird. Als Antrieb für FITNAH-3D diente in der vorliegenden



Untersuchung die Modellierung der bereits vorliegenden regionalen Klimaanalyse für das Land Luxemburg, welches 2021 in deutlich gröberer Auflösung (25 m * 25 m) erstellt wurde.

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen auch die zukünftige Situation in der Periode 2031 - 2060 in zwei unterschiedlichen Klimawandel-Szenarien simuliert. In den Zukunfts-Modellierungen wird die Temperatur aller Höhenprofile zu Beginn der Modellrechnung um 0,7 °C (Szenario „schwacher Klimawandel“) bzw. 2,7 °C (Szenario „starker Klimawandel“) erhöht. Die Temperaturdifferenzen entsprechen den Differenzen für die Sommerperioden zwischen den meteorologischen Perioden 1971 – 2000 im Vergleich zu 2031 – 2060. Grundlage sind die Klimawandel-Szenarien RCP4.5 (25. bzw. 75. Perzentil) für die Region Pro Sud.

Eine städtebauliche Entwicklung wurde in den Zukunftsszenarien in festgelegten Flächen in unterschiedlichen Detaillierungsgraden modelliert. Dies sind einerseits die bereits genehmigten Teilbebauungspläne PAPs, welche anhand ihrer konkreten Planung in das Modell gingen, andererseits die sogenannte RaumPlus-Potential-Flächen, übermittelt durch das Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST). Letztere wurden per statistisch angenommener Verteilung der verschiedenen Flächenanteile unterschiedlicher Nutzungen modelliert. Ziel ist, einerseits die derzeitige stadtklimatische Funktion bzw. Situation dieser Flächen zu beurteilen, und andererseits unter Berücksichtigung der zukünftigen bioklimatischen Situation eine Einschätzung der stadtklimatischen Verträglichkeit der Planung vorzunehmen.

Modellergebnisse

Das Stadtklimamodell liefert für jede Rasterzelle Ergebnisse zur nächtlichen Lufttemperatur, der Kaltluftproduktion und dem Kaltluftströmungsfeld sowie zur Wärmebelastung am Tag. Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms (welche die Strömung über die komplette untere Luftschicht repräsentiert) gelten die Ergebnisse für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung).

Mit Hilfe der Modellergebnisse können nachts überwärmte städtische Bereiche identifiziert (sogenannte städtische Wärmeinseln) und die räumliche Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abgeschätzt werden. Für die Tagsituation wird die Hitzebelastung anhand der PET definiert. Als weitere Parameter werden die Kaltluftvolumenstromdichte, sowie die Strömungsrichtung und – Geschwindigkeit sowie die Kaltluftproduktionsrate ausgegeben. Die aufgeführten Absolutwerte der Klimaparameter sind exemplarisch für eine sommerliche Strahlungswetterlage zu verstehen. Die relativen Temperatur-Unterschiede innerhalb der Siedlungsgebiete bzw. zwischen verschiedenen Landnutzungen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen.

Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte fasst die wesentlichen Aussagen der meteorologischen Parameter für die Nachtsituation in einer Karte zusammen und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten. Dabei gibt es eine Karte für die Ist-Situation sowie je eine Karte für beide Zukunftsszenarien 2031 - 2060. Für



die Situation um 14:00 Uhr ist die PET der einzige ausschlaggebende Parameter, sodass die Karte der PET als „Klimaanalysekarte für die Tagsituation“ verstanden werden kann.

In der Klimaanalysekarte sind für die Grün- und Freiflächen die Modellergebnisse des Kaltluftvolumenstroms in abgestufter Flächenfarbe dargestellt. Bei den Siedlungs- und Verkehrsflächen steht dagegen der Wärmeinseleffekt im Vordergrund (Überwärmung des Siedlungsraums gegenüber dem Umland). Weiterhin ist das bodennahe Strömungsfeld ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur abgebildet. Das Strömungsfeld wurde für eine bessere Lesbarkeit der A0-Karte auf eine Auflösung von 200 m aggregiert, sodass kleinräumige Windsysteme aus der Karte nicht ersichtlich werden (z.B. Kanalisierung von Winden in schmalen Straßenabschnitten). Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in der Karte besondere Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in der Region eine wichtige Rolle spielen. So sind bedeutende flächenhafte Kaltluftabflüsse sowie Kaltluftleitbahnen hervorgehoben. Des Weiteren sind die Bereiche mit überdurchschnittlicher Kaltluftproduktionsrate mittels Schraffur als Kaltluftentstehungsgebiete dargestellt.

Die Klimaanalysekarte gibt zudem eine quantitative Abschätzung für Status Quo und die Zukunftsszenarien: Wie hoch ist der Wärmeinseleffekt? Wie groß ist der Kaltluftvolumenstrom? Welche Strömungsgeschwindigkeit haben die Winde? In der rasterbasierten Karte treten kleinräumige Unterschiede deutlich hervor und Einzelgebäude und Baumgruppen sind gut erkennbar, weshalb sie sich für die Detailplanung eignet.

Einzelbewertungen

Aufbauend auf den Modellergebnisse wurde für jede Teilfläche getrennt für die Tag- und Nacht-Situation eine stadtklimatische Bewertung für die drei Szenarien „Ist“ und „Schwacher bzw. Starker Klimawandel“ vorgenommen. Für die Bewertung von Flächen ist zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen sowie Wälder) und Flächen im Siedlungsraum (mit potenziellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen) zu unterscheiden. Für die Nacht-Situation orientiert sich die Bewertung der Grünflächen an ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt. Dabei bekommen Grün- und Freiflächen im Umfeld von Wohngebieten eine höhere Wertigkeit als im Umfeld von Gewerbegebieten, da in der Nacht die Möglichkeit eines erholsamen Schlafs im Vordergrund steht. Siedlungsferne Grünflächen ohne relevante Klimafunktionen sind aus stadtklimatischer Sicht von geringerer Bedeutung. Die Bewertung des Siedlungsraums für die Nachtsituation basiert auf der nächtlichen Überwärmung, so dass dicht bebaute (z.B. die Innenstadt) und/oder hochversiegelte Bereiche (z.B. Gewerbegebiete) die ungünstigsten Bedingungen aufweisen.

Die steigenden Temperaturen infolge des Klimawandels wirken sich stark auf die fünfstufige Bewertung (*sehr gering bis sehr hoch*) des Siedlungsraums in den Zukunftsszenarien aus. In der Ist-Situation und dem Szenario „schwacher Klimawandel“ ist die Klasse „*sehr hoch* belastet“ für die Nachtsituation nicht belegt. Nur ca. 3,5 % (Ist) bzw. 16,8 % (schwacher Klimawandel) der Flächen sind als hoch bioklimatisch belastet klassifiziert. Im Szenario „starker Klimawandel“ reihen sich dagegen ca. 80 % der Flächen in die Klassen „*hoch* und *sehr hoch* belastet“ ein.



In Bezug auf die Kaltluftströmungen spielt der Klimawandel dagegen eine untergeordnete Rolle, da die Antriebe für Kaltluft unverändert (Geländeneigung) bzw. nahezu konstant bleiben (Temperaturunterschied zwischen Siedlungsraum und Umland). Die Austauschprozesse ändern sich dementsprechend nur im Nahbereich der in den Zukunftsszenarien modellierten Entwicklungsflächen signifikant.

Die Bewertungen zur Tag-Situation betrachten die Wärmebelastung außerhalb von Gebäuden. Dabei sind Wohn- und Gewerbegebiete gleichermaßen von Bedeutung. Zudem rücken der Straßenraum für Wegebeziehungen sowie die Aufenthaltsqualität auf Plätzen und Grünflächen in den Vordergrund. Die Wärmebelastung hängt wesentlich von der Verschattung ab, sodass sich gerade bei Grün- und Freiflächen teilweise konträre Bewertungen zur Nacht-Situation ergeben. Eine Freifläche kühlt in der Nacht stark aus, weist an Sommertagen (ohne Bewölkung) aber eine hohe Wärmebelastung auf, wenn keine Bäume vorhanden sind. Demgegenüber ist die Aufenthaltsqualität in Wäldern und (baumbestandenen) Parks auch an Sommertagen sehr hoch. Die für die Zukunftsszenarien erhöhte ins Modell eingegebene Start-Lufttemperatur wirkt sich deutlich auf die PET und somit auch die Bewertung der Flächen am Tage aus. Der Flächenanteil von hoch und sehr hoch belasteten Siedlungsflächen erhöht sich von ca. 8 % in der Ist-Situation auf ca. 16 % im Szenario „schwacher Klimawandel“ und ca. 60 % im Szenario „starker Klimawandel“.

Die Einzelbewertungen geben eine Einschätzung der klimatischen Situation auf einer bestimmten Fläche für den Tag, die Nacht und für den Status Quo und die Zukunftsszenarien 2031 - 2060 und verzweigen dadurch die komprimierte Information der Planungshinweiskarte auf mehrere Einzelinformationen, die aus den Geodaten abgelesen werden können. So können Handlungsbedarfe im Wirkraum oder Schutzbedarfe im Ausgleichsraum (aus der Planungshinweiskarte) auf die Tageszeit oder den Prognosehorizont festgelegt und zielgerichtete Maßnahmen in Bezug auf das Kaltluftprozessgeschehen (Nacht), den Aufenthaltskomfort im Freien (Tag), die heutige oder zukünftige Flächenkulisse entwickelt werden.

Planungshinweiskarte

In der Planungshinweiskarte, als zentralem Produkt, wird eine Bewertung der Flächen hinsichtlich der Handlungspriorität für Anpassungsmaßnahmen im Siedlungsraum sowie des stadtklimatischen Schutzbedarfs von Grün- und Freiflächen vorgenommen. Die Bewertungen beruhen auf den stadtklimatischen Funktionen (ablesbar in den Einzelbewertungen), ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarte stellt aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

In der Planungshinweiskarte werden die **städtebaulichen Entwicklungsflächen**, welche mit einer konkreten Planung in die Modellierung eingingen und eine relevante Mindestgröße innehaben, zusätzlich schematisch auf ihre stadtklimatische Verträglichkeit hin beurteilt. Diese basiert auf dem Vergleich der Ist-Situation (Bedeutung der Grünfläche, bzw. bioklimatische Verhältnisse der Siedlungsfläche) mit der Situation im modellierten Zukunftsszenario. Besonderes Konfliktpotenzial aus bioklimatischer Sicht besteht bei Entwicklungsflächen, die sich im Bereich von bedeutenden Kaltluftflüssen oder Kaltluftleitbahnen befinden.



Dem Werk der Stadtklimaanalyse für die Region Pro Sud ist ein 20 Maßnahmen umfassender **Maßnahmenkatalog** angehängt, der Empfehlungen für verschiedene Räume und Anwendungsbereiche aufzeigt. Die Maßnahmen reichen vom Themenkomplex „Thermisches Wohlbefinden im Außenraum“ über die „Verbesserung der Durchlüftung“ bis zur „Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum“.

Sämtliche Produkte der Stadtklimaanalyse liegen als Geodaten bereit und stehen der Verwaltung in Form von gelayouteten GIS-Projekten (ArcGIS) als **Digitales Stadtklimamanagementsystem** zur Verfügung.

Primäres Anwendungsfeld der Klimaanalyse im Allgemeinen sowie der Planungshinweiskarte und des Maßnahmenkatalogs im Speziellen ist die Bereitstellung von hochwertigem Abwägungsmaterial für Planungs- und Entscheidungsprozesse im Rahmen der Bauleitplanung. Aufgrund des erreichten Detaillierungsgrades der Analyse kann hier neben der vorbereitenden erstmalig auch die verbindliche Bauleitplanung hinreichend gut bedient werden. Damit sind nun auch valide Ersteinschätzungen z.B. hinsichtlich der Sensibilität einzelner Stadtentwicklungsvorhaben seitens der Verwaltung sowie bei Bedarf eines externen Gutachters möglich.

Über dieses klassische Anwendungsfeld hinaus können die Ergebnisse der Klimaanalyse aber auch in weiteren formellen und informellen Planungen der Gemeinden zur Anwendung kommen. Hierzu zählen u.a. die Sanierung des öffentlichen Raums, die Verkehrswegeplanung, die Grünflächenentwicklung sowie teil- oder gestädte Leitbildprozesse oder auch Fragen der Sozialplanung bzw. der Umweltgerechtigkeit.

Um diesen Eigenanspruch der Klimaanalyse sowie die insgesamt weiter steigende gesellschaftliche und damit politische Bedeutung eines gesunden Stadtklimas auch in der Zukunft adäquat bedienen zu können, ist ein regelmäßiger Fortschreibungsturnus für die Analyse von ca. 5 bis 10 Jahren anzustreben.



1. Hintergrund und Anlass

In Zeiten des Klimawandels lassen sich die Folgen insbesondere in Form von häufigeren Extremwetterereignissen oder Hitzeperioden bereits deutlich erkennen. Neben dem Klimaschutz durch Treibhausgasreduktion weist besonders die Klimaanpassung in Städten eine hohe Relevanz auf. Vor allem dicht bebaute Innenstädte sind durch erhöhte Hitzebelastung, geringe natürliche Versickerung und hohe Emissionen besonders betroffen. Gleichzeitig weisen Städte im Vergleich zum peripheren Umland eine höhere Bevölkerungsdichte und damit eine hohe Anzahl vulnerabler Bevölkerungsgruppen auf. Diese gilt es vor belastenden Umwelteinflüssen wie Hitze zu schützen.

Das Schutzgut *Klima* ist demnach ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung. Vor dem Hintergrund der Flächenkonkurrenz sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel, um Planungen sachgerecht zu beurteilen. Aus der Kenntnis des in Städten und Siedlungen vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse ab.

Die stadtklimatische Analyse soll sowohl den Ist-Zustand der klimatischen Verhältnisse im Gebiet der Region Pro Sud sowie die prognostizierten Verhältnisse für die Periode 2031 - 2060 darstellen und abschließend bewerten. Die Ergebnisse sollen als Beurteilungsgrundlage für baurechtliche Planungen, im Zuge der städtebaulichen Entwicklung der Region Pro Sud dienen und somit eine gezielte Einordnung der geplanten Bauflächen im Hinblick auf die klimatische Situation ermöglichen. Somit müssen neben der aktuellen Hitze- bzw. Wärmebelastung der Siedlungsflächen am Tage und in der Nacht auch die Ausgleichsleistungen der Grün- und Freiflächen erfasst werden. Letztere können in der Nacht bedeutende Kaltluft- und Frischluftentstehungsgebiete sowie Luftleitbahnen darstellen. Sie stellen eine Durchlüftung der Siedlungsgebiete sicher und garantieren eine nächtliche Abkühlung, sodass eine Bebauung dieser Korridore zu vermeiden oder anzupassen ist. Zum anderen wird für die Tagsituation das Potenzial der Grün- und Freiflächen als kühler Erholungsraum untersucht.

Die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse sollen dazu dienen, das Schutzgut Klima in zukünftigen Planungen ganzheitlich zu berücksichtigen und klimatisch bedeutsame Fläche entsprechend zu berücksichtigen. Ziel ist es dabei nicht, zukünftige, in Diskussion befindliche Baugebiete ganzheitlich auszuschließen, sondern diese möglichst klimaverträglich zu gestalten.

Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mikroskalige Rechnung (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 5 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Gebiet der Region Pro Sud zu erhalten. Die Verwendung der hohen Auflösung des 5 m x 5 m-Raster erlaubt die Berücksichtigung von Gebäuden als Strömungshindernisse. Durch die kleinräumige Erfassung von Gebäuden und Grünstrukturen, insbesondere Bäumen, samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima und insbesondere das Strömungsfeld getroffen werden. Die Ergebnisse der Modellrechnung spiegeln neben der Nachtsituation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider und erlauben somit eine umfassende Betrachtung des Bioklimas in der Region.



Neben den Kartenprodukten umfasst das Ergebnis der Stadtklimaanalyse als digitale Version das „Stadtklimamanagementsystem“. Es beinhaltet sämtliche Produkte inkl. deren (Meta)Daten und steht der Verwaltung in Form von gelayouteten GIS-Projekten (ArcGIS) zur Verfügung.

2. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse und Ihrer Produkte ist – seinem Wesen als Fachgutachten entsprechend – ein breites fachliches Grundlagenwissen notwendig. Das Themenspektrum reicht dabei von den Zusammenhängen zwischen dem Thermischen Komfort und der Menschlichen Gesundheit (vgl. Kapitel 2.1) im Kontext des lokalen Klimawandels (vgl. Kapitel 3) bis hin zu stadtklimatisch relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (vgl. Kapitel 2.2). Zum besseren Verständnis werden im Folgenden zentrale Punkte dieses Spektrums überblicksartig skizziert. Die entsprechenden Quellenhinweise regen bei Bedarf zum Weiterlesen an und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT

Die bodennahe atmosphärische Umgebung besitzt vielfältige Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen. Diese lassen sich unter folgenden Oberpunkten subsumieren:

- Wohlbefinden
- Leistungsfähigkeit
- Morbidität (Krankheitsrate) und Mortalität (Sterberate)

Den Parametern Windgeschwindigkeit, Luft- bzw. Strahlungstemperatur sowie Luftfeuchtigkeit kommen dabei eine zentrale Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang gilt, dass sowohl ein „zu hoch“ als auch ein „zu niedrig“ in den Ausprägungen der jeweiligen Werte zu negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit führen kann. Mit Blick auf den thermischen Komfort gilt dabei beispielsweise eine Kombination aus hohen Lufttemperaturen und niedrigen Windgeschwindigkeiten als gesundheitlich belastend (Abbildung 1).

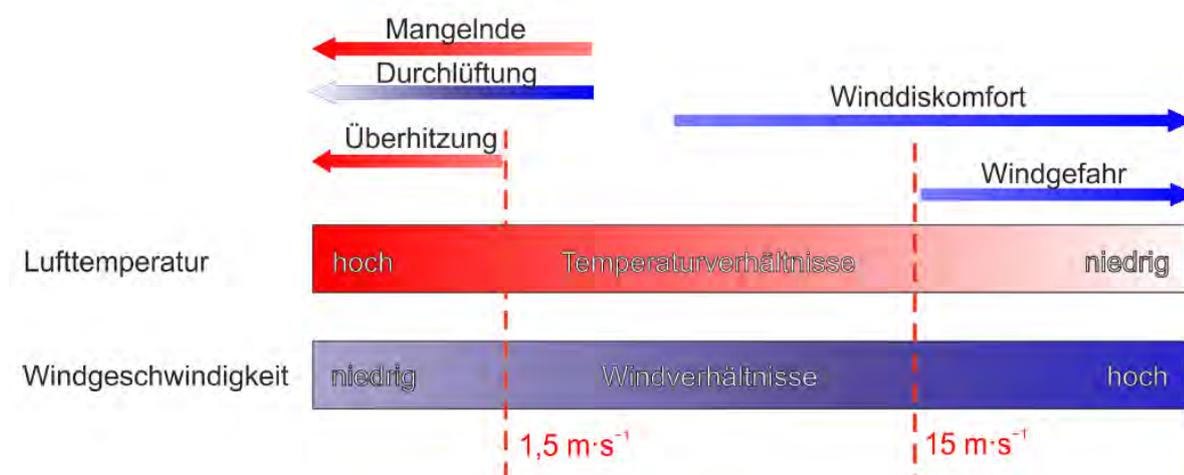


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))

Zur Quantifizierung der klimatischen Belastung auf den Menschen wurden in der Stadt- und Regionalklimatologie humanbiometeorologische Kenngrößen eingeführt, von denen sich insbesondere zwei in den letzten Jahrzehnten etabliert haben: Im deutschsprachigen Raum ist insbesondere die „Physiologisch Äquivalente Temperatur“ (PET) zu nennen (Höppe und Mayer 1987). International gebräuchlich ist darüber hinaus der „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI: Jendritzky 2007). In der Vergangenheit kam zudem auch der heute eher nicht mehr gebräuchliche Index „Predicted Mean Vote“ (PMV) zum Einsatz (Fanger 1972). Allen Ansätzen ist gemein, dass sie neben den meteorologischen Einflussgrößen auch die Wärmebilanz des Menschen in die Berechnung mit einfließen lassen (Abbildung 2). Auf diese Weise können physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die beispielsweise bei der PET von einer extremen Kältebelastung bis zu einer extremen Wärmebelastung reichen. Die Bestimmung der humanbiometeorologischen Kenngrößen erfordern eine beträchtliche Anzahl von Eingangsgrößen, die teilweise nur mit erheblichem Mess- bzw. Modellierungsaufwand bestimmt werden können. Deshalb besitzen nach wie vor Auswerteroutinen wie die Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) oder Tropennächte (mit $T_{\min} \geq 20^{\circ}$) eine hohe Praxisrelevanz (DWD 2020). Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn für größere Räume (z.B. Staaten, Flächenbundesländer) auf der Basis von Zeitreihenanalysen eine Ersteinschätzung zu thermischen Belastungen vorgenommen werden soll.

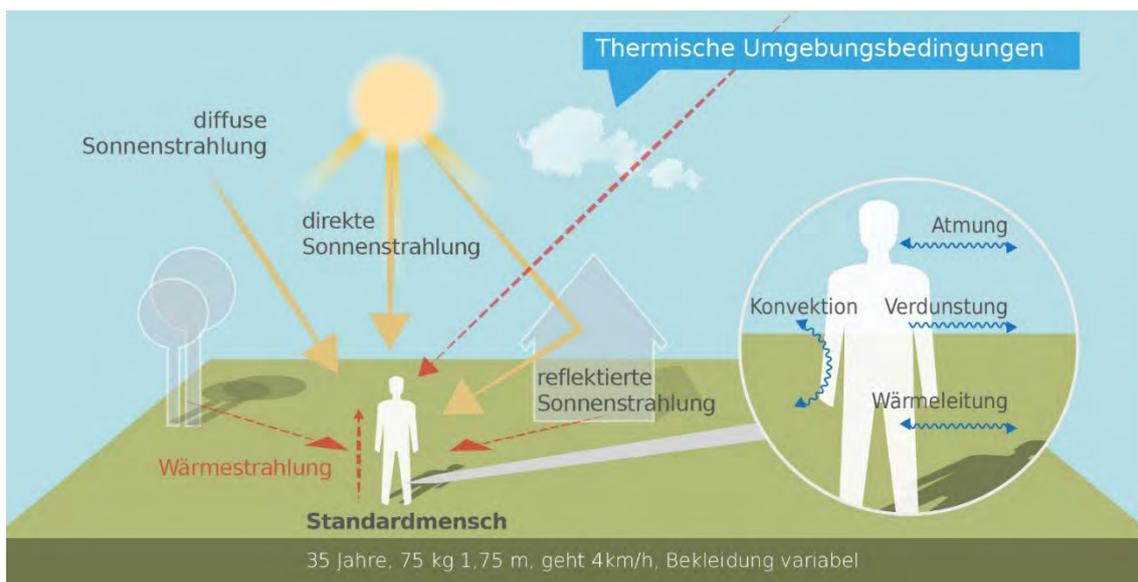


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2023a)

Sowohl die PET als auch der UTCI sind für die Verwendung im Freien und unter Einstrahlungsbedingungen (also für die Tagsituation) optimiert. In Innenräumen – in denen sich Menschen in den Industrieländern zu ca. 90 % der Zeit zum Wohnen und Arbeiten aufhalten – wird in aller Regel auf die Raumtemperatur als maßgebliche Größe Bezug genommen: „Die Wechselwirkung zwischen dem Außenklima und dem Innenraumklima erfolgt heute aufgrund der hohen Wärmedämmung üblicher Wohngebäude fast ausschließlich über den Luftwechsel, wobei die Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe ist“ (VDI 2008a, 24).

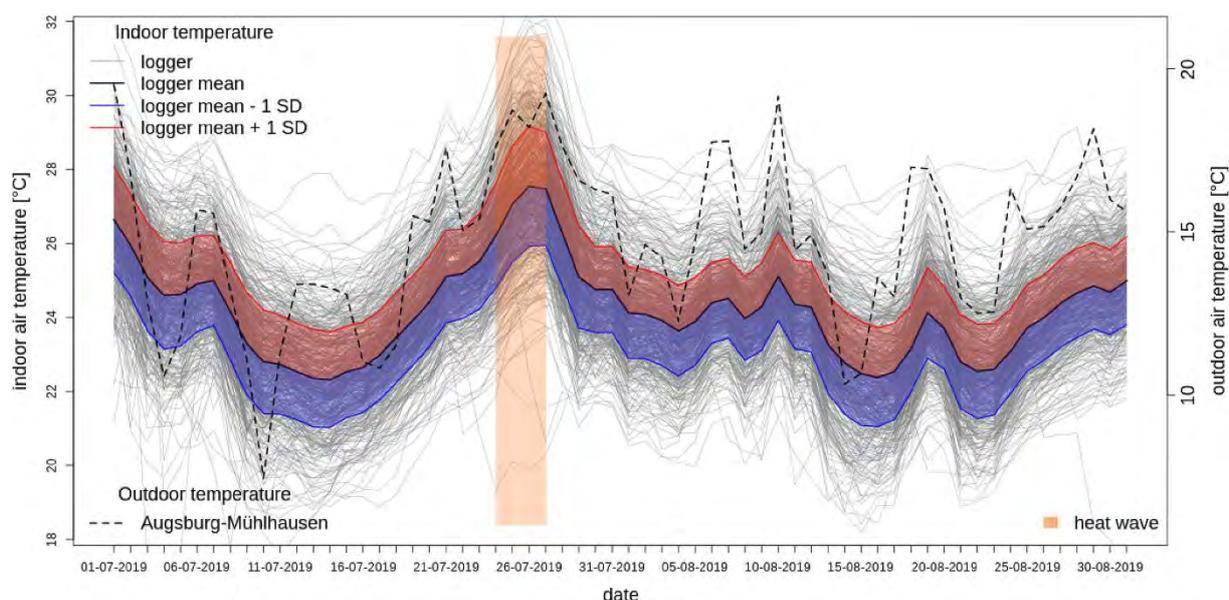


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

Während in Arbeitsstätten hohe Temperaturen am Tage zu Belastungen führen, stellen in privaten Wohnräumen insbesondere hohe Nachttemperaturen eine große Herausforderung dar: „Durch erholsamen Schlaf, der nur bei günstigen thermischen Bedingungen erreicht wird, kann sich der Organismus von thermischen Belastungen des Tages regenerieren. Ungünstige Klimabedingungen während der Nachtstunden können dagegen zu einer Akkumulation von Belastungen führen. Dabei sind in der Regel zu warme Bedingungen als ungünstig anzusehen“ (VDI 2008a, 23). Das Umweltbundesamt empfiehlt für einen entsprechend erholsamen Schlaf eine Schlafzimmertemperatur in der Spannweite von 17-20 °C (UBA 2005). Dass die Einhaltung dieser Wertespanne in den weitgehend nicht-klimatisierten Wohngebäuden in Deutschland über die Sommermonate schwierig bis unmöglich ist, dürfte der Alltagserfahrung vieler Bürger:innen entsprechen. Den empirischen Beleg hierfür liefert eine wissenschaftliche Studie, in der Stundenwerte der Temperaturen in 500 über das Augsburger Stadtgebiet verteilten Schlafzimmern während der Sommermonate 2019 gemessen und ausgewertet wurden (Abbildung 3). Die Ergebnisse veranschaulichen, dass unabhängig von der räumlichen Lage im Stadtgebiet, nur an einzelnen Standorten und an einzelnen Tagen die vom Umweltbundesamt empfohlenen Komfortwerte von 20 °C unterschritten wurden. Tatsächlich schwankten die Mittelwerte auch nachts um 25 °C (bei Maximalwerten von nahe oder sogar über 30 °C) (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021).

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen ab (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule). Das Ausmaß der Abnahme ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt die Leistungsfähigkeit bei moderater körperlicher Arbeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO 1989). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 - 12 % aus (Urban & Steininger 2015). In einer amerikanischen Studie, die die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit und ohne Klimaanlage vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von 10-15 % für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden (Laurent et al. 2018).

Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst nicht nur das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen, sondern wirkt sich unmittelbar auf die Morbidität und Mortalität der Bevölkerung aus. Als besonders vulnerabel gelten in diesem Zusammenhang Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahre (aufgrund



einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie ältere Menschen ab 65 Jahren bzw. vor allem über 80 Jahren (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Santholz und Sett (2019) kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozioökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Senior:innen angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen genannt. Single-/Pärchen-Haushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4).

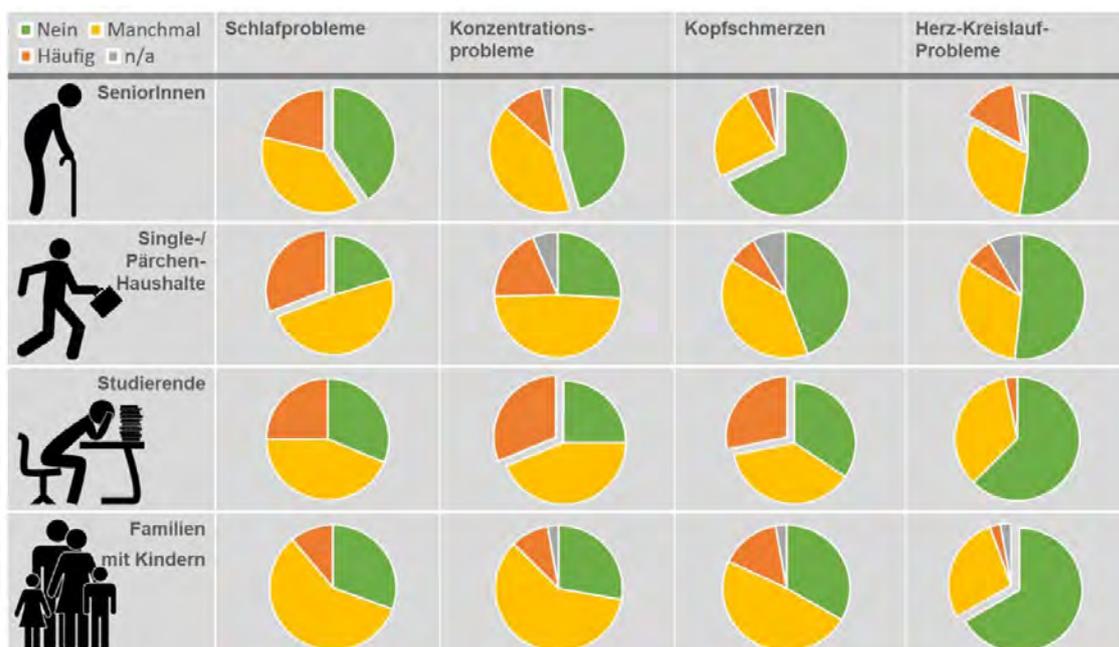


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

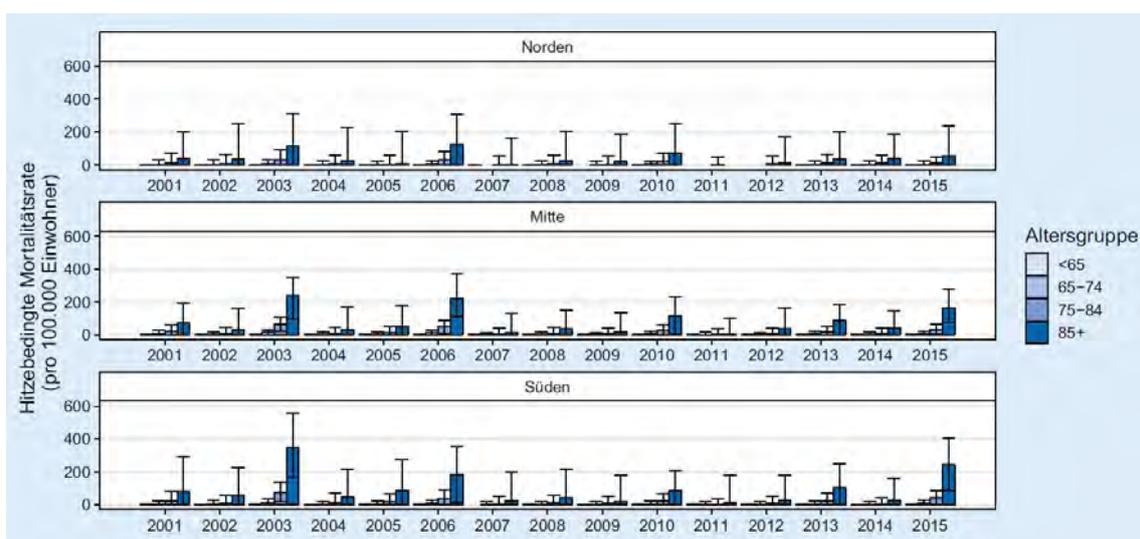


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)

2.2 WÄRMEINSELEFFEKT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Stadtkörpers. So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus innerstädtischen Grün-/Freiflächen das Temperaturniveau der in der Stadt lagernden wärmeren Luftmassen lokal gesenkt werden. Entscheidend ist dabei, dass die kältere Außenluft auch ins Gebäudeinnere gelangen kann, sodass dem nächtlichen Luftaustausch („natürliche Ventilation“) zwischen Gebäude und Umgebungsluft eine Schlüsselrolle zukommt (vgl. Groß 2021). Auch die VDI 3787, Blatt 5 (12/2003) benennt die Umgebungsluft als die zentrale Auswertungsgröße, um die Kaltluftwirkung in der Nacht zu erfassen.

Als Prämisse für die vorliegende Analyse werden die relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge im Folgenden überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet. Wie Abbildung 6 zeigt, sind insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme zu nennen. Allen Prozessen ist gemein, dass sie vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit nächtlicher Bodeninversion auftreten. Bei einer Inversion kehrt sich der normalerweise mit der Höhe abnehmende Temperaturverlauf um. Der Boden und damit auch die darüber liegende bodennahe Luftschicht kühlen sich durch Ausstrahlung stärker ab, sodass die bodennahe Schicht kälter ist als die darüber liegende Luftschicht. Die obere Begrenzung dieser Bodeninversionsschicht liegt dabei in der Höhe über Grund, in der sich die Abkühlung des Erdbodens nicht mehr auswirkt (vgl. DWD 2023a). Inversionen können durch großräumige Advektion von Warmluft, durch Absinkvorgänge in der Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen. Eine Inversion stellt damit eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen tiefliegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert (sie wirken in der Atmosphäre stabilisierend). In den Sommermonaten gehen mit ihnen häufiger thermische und ggf. auch lufthygienische Belastungen einher.



Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017(oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten))



Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke et al. 2017). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, in Kombination mit einem geringen Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche. Die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss) verstärken die Ausprägung des Stadtklimas. Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindsystem“). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts kann dagegen kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und innerstädtischen Grünflächen in die überwärmten Quartiere strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse.

Während Flurwindssysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von < 1 m/s und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-) Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-Talwindssystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich > 2 m/s sowie Kaltluftmächtigkeiten von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodische lokale Windsysteme und damit um eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata (siehe Abbildung 6 oben). Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkere Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den Hochflächen und Hängen. Beim Berg-/Talwindssystem kann zusätzlich ein Zusammenfließen und eine talabwärts gerichtete Kanalisierung erfolgen, sodass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch größere Kaltluftvolumina möglich sind.

Alle geschilderten Prozesse bzw. Klimafunktionen können durch planerische Entscheidungen sowohl unterstützt als auch gestört oder sogar zerstört werden. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003). Kaltluftproduktionsraten, Kaltluftmächtigkeiten und Kaltluftvolumenströme, die der Ableitung des oben beschriebenen Kaltluftsystems zugrunde liegen, sind relative Größen, die demnach auch in einer klimawandelbedingt wärmeren Atmosphäre der Zukunft unverändert bestehen bleiben (wenn sie nicht durch Flächennutzungsänderungen wie z.B. großflächige Gewerbegebiete oder Siedlungserweiterungen modifiziert werden). Selbiges gilt in der Konsequenz für die aus den Größen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen, wobei die Kaltluft im Klimawandel tendenziell wärmer als gegenwärtig ist und damit weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen beiträgt. Es wird die Aufgabe der gesamten Fachdisziplin sein, diesem Umstand durch die Entwicklung neuer Auswerteverfahren Rechnung zu tragen. Bis entsprechende neue Verfahren etabliert sind, entspricht es dem Stand der Technik, die Auswirkungen des Klimawandels vor allem an den thermischen Kenngrößen wie der Lufttemperatur und/oder humanbioklimatischen Indizes wie der PET festzumachen.

2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

Die in den vorherigen Kapiteln geschilderten Zusammenhänge und Prozesse zum Thermischen Komfort und Kaltlufthaushalt werden als Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse in raumspezifischen Analysen untersucht. Die Analysen sind im Grundsatz seit den frühen 1990er Jahren Stand der Technik. Die zugrunde liegenden Methoden und Instrumente unterlagen seither allerdings einer stetigen Fortentwicklung, die durch die Aktivitäten zur Klimafolgenanpassung insbesondere seit den 2010er Jahren stark an Dynamik und Qualität gewonnen hat. Anders als beispielsweise beim lufthygienischen Wirkungskomplex oder der Lärmbelastung gibt es für die thermische Belastung bisher noch keine normative Regelung zu Richt- oder gar Grenzwerten. Als Konsequenz daraus ist die Definition, welches Belastungs-/Schutzniveau in der betrachteten Kommune erreicht oder vermieden werden soll, das Ergebnis eines planerisch-politischen Abwägungsprozesses, der durch fachgutachterliche Entscheidungsgrundlagen unterstützt wird.

Die etablierten Instrumente für entsprechende Grundlagenuntersuchungen stellen Stadtklimaanalysen sowie ggf. Detailgutachten für kleinräumigere Planungsprozesse (z.B. verbindliche Bebauungsplanung, Stadtsanierung, Grünflächenentwicklung) dar. Mindestanforderungen an die zu verwendenden Methoden und zu erstellenden Produkte werden in umweltmeteorologischen VDI-Richtlinien vordefiniert. Von Bedeutung sind insbesondere folgende Richtlinien:

- VDI 3785 Blatt 1 (2008): Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima
- VDI 3787 Blatt 1 (2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen
- VDI 3787 Blatt 2 (2022): Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas
- VDI 3787 Blatt 5 (2003): Lokale Kaltluft
- VDI 3787 Blatt 8 (2020): Stadtentwicklung im Klimawandel
- VDI 3787 Blatt 9 (2004): Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z.B. VDI 3787, Bl.5; seit März 2024 als Entwurf vorliegend) bzw. in Zusammenlegung (VDI 3871, Bl.1 und Bl.2 und Bl.9 mit VDI 3785, Bl.1). Folglich befindet sich der Stand der Technik in einem stetigen Wandel. Tendenziell ist zudem zu beobachten, dass teilweise mehrere Jahre vergehen, bis neue methodische Paradigmen und technische Möglichkeiten in die Richtlinien Einzug gehalten haben. Insofern werden die Richtlinien nicht selten von der Dynamik der täglichen Praxis überholt und definieren daher eher einen Mindeststandard und weniger eine im Detail einzuhaltende absolute Norm.

Untersuchungsansätze einer Stadtklimaanalyse

Stadtklimaanalysen können dem Stand der Technik nach auf verschiedenen methodischen Analyseverfahren basieren. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) unterscheidet in einer aktuellen Veröffentlichung die Methoden der „Abschätzung“, des „Klimatopansatzes“ (bisweilen auch 2D- GIS-Modellierung benannt) sowie der „(numerischen) Stadtklimamodellierung“ (Tabelle 1). In der Praxis existieren auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der anders als in der Übersicht des HLNUG dargestellt keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um dieser Herausforderung zu begegnen).



Tabelle 1: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG 2022, 18)

	M1 Abschätzung nach Versiegelung	M2 Klimatope nach VDI	M3 Stadtklimamodellierung
Was kann die Klimaanalyse-methode leisten?	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitative Einschätzung der Verteilung der Wärmebelastung im Gebiet • Qualitative Einteilung von Belastungs- und Ausgleichsräumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimaeigenschaften der Flächen • Qualitative Einschätzung der Flächen als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume • Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kenntage, Volumenstrom Kaltluft etc-) • Kaltluftentstehung und -abfluss
Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Kleine und mittlere Kommunen • Kommunen mit weniger komplexen Stadt- / Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen ersten Überblick zur Belastungssituation bekommen möchten 	<ul style="list-style-type: none"> • Kommunen aller Größenklassen mit eher einfachem Relief / geringen Höhenunterschieden • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen vertieften Überblick zur Belastungssituation inklusive Kaltluft bekommen möchten 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere / große Kommunen mit komplexen Herausforderungen durch den Klimawandel • Kommunen, die für städtebauliche Entwicklungen bzw. für ein Klimaanpassungskonzept konkrete Angaben zu Temperatur und Kaltluft benötigen
Erforderliche Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Versiegelungsgrad, z. B. über Luftbildanalyse • Bebauungsstruktur/-typ • Flächennutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen zur tatsächlichen Flächennutzung (z. B. ATKIS, CORINE, Realnutzungskartierung) • Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur (z. B. digitales Höhenmodell) • Fachkarten hinsichtlich Versiegelung oder Baudichte/-höhe und Bebauungsart 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhendaten, z. B. Digitales Geländemodell, Rasterdaten der Geländehöhe • Nutzungsdaten, z. B. ATKIS, Biotop-/Vegetationskartierung, Realnutzungskartierung • Fachkarten zur Versiegelung, Baudichte/ -höhe, Bebauungsart, Rasterdaten zur Bebauungsstruktur • Messdaten zu physikalischen Größen z. B. Wind, Temperatur
Welche Informationen liefert die Klimaanalyse-methode?	<ul style="list-style-type: none"> • Einstufung der thermischen Belastung im Siedlungsbereich 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimatope • Klimaanalysekarte 	<ul style="list-style-type: none"> • Zahlreiche Datensätze mit Aussagen zu Temperatur, Kenntage (Gegenwart und Zukunft), Analyse zur Kaltluft • Je nach Aufbereitung entsprechende Karten



Darüber hinaus stellen die in der Übersicht nicht genannten Messkampagnen (Messfahrten, Vertikalsondierungen, stationäre Messungen) weiterhin eine wichtige methodische Grundlage für Stadtklimaanalysen dar – zumeist in Ergänzung (bzw. zur Validierung) der anderen Methoden, bisweilen aber auch als rein messbasierte Stadtklimaanalysen. Perspektivisch werden zudem auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierende Lösungen das Methodenset ergänzen, indem Sie von Ergebnissen der übrigen Methoden lernen und diese mit deutlich geringerem Aufwand auf andere Untersuchungsräume übertragen.

Wie aus der Zusammenstellung bzw. dem zugehörigen Leitfaden der HLNUG hervorgeht, weisen alle Analysemethoden individuelle Stärken und Schwächen auf, wobei die Numerische Stadtklimamodellierung (M3) als qualitativ hochwertigste Methode gilt. Numerische Modellierungen weisen gegenüber anderen Analyseverfahren den großen Vorteil auf, dass sie umweltmeteorologisch relevante Größen wie Wind- und Temperaturfelder flächenhaft und unter Berücksichtigung der zentralen physikalischen atmosphärischen Prozesse wissenschaftlich fundiert ermitteln können. Aus diesen Ergebnissen können im sogenannten postprocessing stadtklimatisch relevante Kenngrößen in ihrer quantitativen Ausprägung abgeleitet werden (z.B. Kaltluftparameter, humanbioklimatische Indizes). Numerische Modelle bieten darüber hinaus den Vorteil, Planungsvarianten und Maßnahmen in ihrer Wirkung quantitativ analysieren und auf diese Weise einen validen Beitrag zur klimaökologischen Optimierung von (raum-)planerischen Abwägungs- und Entscheidungsprozessen auf allen Maßstabsebenen leisten zu können.

Übersicht stadtklimatischer Modelle

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft werden verschiedene numerische Modelle im Rahmen von Stadtklimaanalysen genutzt (Tabelle 2). Grundsätzlich unterscheiden sich die aufgezählten Modelle in vielen Eigenschaften, welche letzten Endes auch den Zweck des beabsichtigten Anwendungsgebiets dienen. Jedem Modell ist dabei ein Anwendungsfall zugeordnet, zu welchem das jeweilige Modell im operationellen Einsatz geeignet ist. Grundlegend unterscheiden sich die aufgeführten Modelle in der Art und Weise, wie naturgetreu sie die Atmosphäre abbilden. Dies lässt sich grob in die folgenden Kategorien einteilen:

1. Modelle, die die Atmosphäre zur Reduktion des rechnerischen Aufwandes über annähernde Gleichungen modellieren oder stark vereinfachte Annahmen zur Reduktion des zu rechnenden Modellgebiets treffen.
2. Modelle, die zwar die physikalischen Grundgleichungen zur Beschreibung des atmosphärischen Zustands (Bewegungsgleichungen, erster Hauptsatz der Thermodynamik, Kontinuitätsgleichung und die Zustandsgleichung für ideale Gase) lösen, dabei aber die atmosphärische Turbulenz vollständig parametrisieren (RANS-Modelle).
3. Modelle, die auch die atmosphärische Turbulenz bis zu einer sog. „Subgridskala“ auflösen und so nur einen Teil der Turbulenz parametrisieren, welcher per se durch die gewählte Auflösung der Modellrechnung parametrisiert eingeht (LES-Modelle).

Dabei steigt von Kategorie 1 zu Kategorie 3 der Grad der naturgetreuen Modellierung und gleichzeitig die Komplexität der Nutzung und der Rechenaufwand. Modelle der Kategorie 3 werden derzeit hauptsächlich im wissenschaftlichen Kontext verwendet, da für ihre Verwendung aufgrund des hohen Rechenaufwandes ein Zugang zu einem Hochleistungsrechner benötigt wird.

Eine gute Möglichkeit, den Rechenaufwand der Modellierung so gering wie möglich zu halten ist das sogenannte Nesting. Dabei wird, je nach Umsetzungsart, im Modell entweder ein Kerngebiet im Untersuchungsbereich feiner aufgelöst als die Umgebung (Online-Nesting) oder ein kleinräumiges Untersuchungsgebiet mit



den Ergebnissen einer übergeordneten Modellierung angetrieben (Offline-Nesting). Beide Methoden sparen Rechenzeit dadurch ein, dass das Kerngebiet des Interesses ausreichend hochaufgelöst modelliert, aber auch kleingehalten werden kann und dennoch die beeinflussenden Prozesse aus dem Umfeld auf das Kerngebiet einwirken. Der Begriff Online-Nesting rührt daher, dass die Berechnung des Kerngebiets und des direkt anschließenden, gröber aufgelöstem umgebenden Gebiets direkt in einem Modelllauf durchgerechnet wird. Beim Offline-Nesting muss hingegen die übergeordnete, grobskaligere Modellierung vor dem hochaufgelösten Bereich gerechnet werden.

Tabelle 2: Auswahl an numerischen Modellen für den Einsatz im Rahmen von Stadtklimaanalysen.

Modell	Kategorie	Mögliche horizontale Auflösung für großräumige Anwendungen	Ausgabegrößen
FITNAH-3D	2	5 m – 1.000 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
KALM	1	20 m – 200 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
KLAM_21	1	20 m – 50 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
MUKLIMO_3	2	20 m – 100 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
PALM-4U	3	15 m – 50 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder



3. Das Klima in Luxemburg

3.1 LUFTEMPERATUR

Das Klima charakterisiert den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren betrachtet. Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) hat die aktuell gültige internationale klimatologische Referenzperiode auf den Zeitraum 1961 - 1990 festgelegt. Die nationalen Wetterdienste haben aber die Möglichkeit, andere Bezugszeiträume zu verwenden, die auf aktuelleren Daten (z.B. 1991-2020, vgl. Abbildung 7) beruhen und dennoch die vorgegebenen Kriterien der WMO erfüllen (MeteoLux, 2021).

Die folgende Beschreibung des luxemburgischen Klimas basiert primär auf Messungen der einzigen offiziellen WMO-Station des Landes. Die Station Findel/Flughafen (WMO ID = 06590) befindet sich im Zentrum von Luxemburg (49° 37' 33,9" N / 6° 12' 12,5" E) auf einer Höhe von 376 m über dem Meeresspiegel. Sie wird von MeteoLux (Administration de la navigation aérienne du Luxembourg betrieben). Die Station erfasst alle relevanten meteorologischen Größen wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und verschiedene Strahlungsparameter. Transiente Zeitreihen der meisten gemessenen Parameter seit 1947 verfügbar. Um die historische Entwicklung des Großherzogtums zu beschreiben, werden Messungen der Lufttemperatur und des Niederschlags im Zeitraum von Januar 1947 bis Dezember 2021 verwendet.

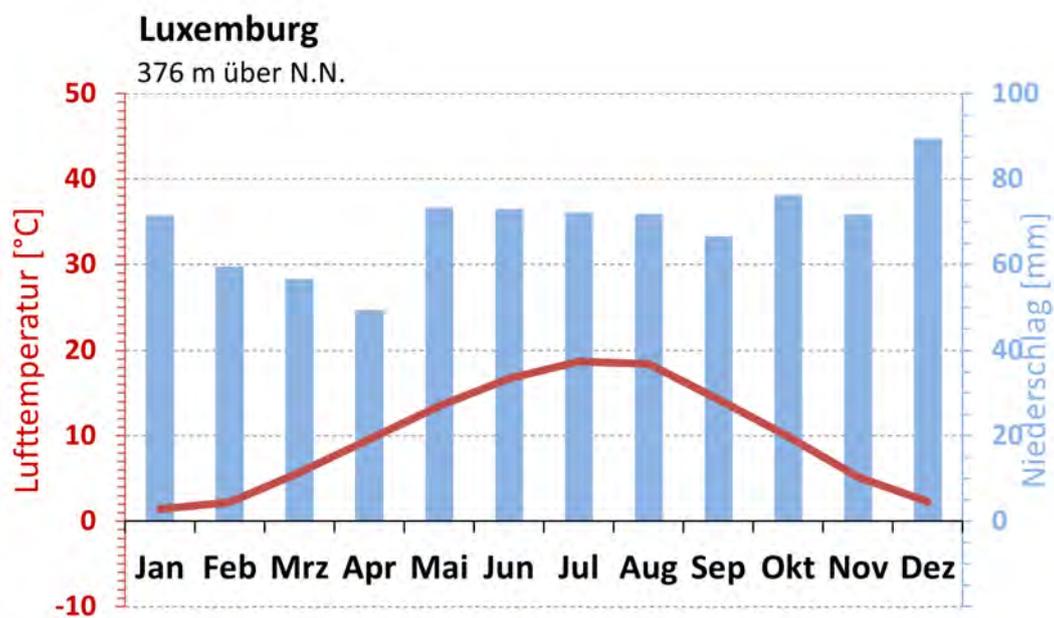


Abbildung 7: Klimadiagramm von Luxemburg für den Zeitraum 1991 bis 2020. Es wurden die Daten der MeteoLux-Station Flughafen Findel verwendet (Datenquelle: MeteoLux 2021) (Diagramme climatique du Luxembourg pour la période 1991 à 2020 utilisant les données de la station MeteoLux de l'aéroport de Findel (Source de données: MeteoLux 2021))

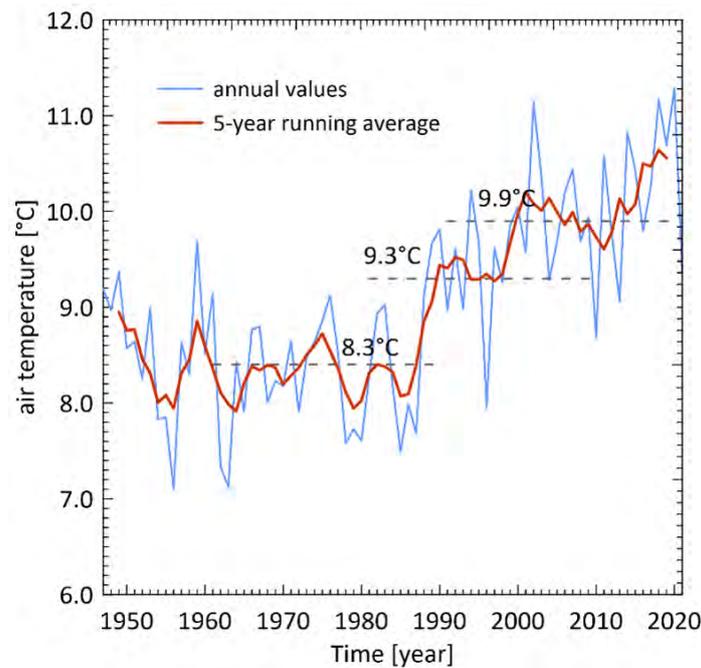


Abbildung 8: Jahresmittelwerte der Lufttemperatur für die Station Findel (blaue Linie), gleitender 7-Jahres-Durchschnitt (rote Linie) und für die drei Referenzzeiträume 1961 bis 1990 (8,3 °C), 1981 bis 2010 (9,3 °C) und 1991 bis 2020 (9,9 °C); Auswertungszeitraum 01/1947 bis 12/2021. (*Température moyenne annuelle de l'air pour la station du Findel (ligne bleue), moyenne mobile sur 7 ans (ligne rouge) et pour les trois périodes de référence 1961 à 1990 (8,3 °C), 1981 à 2010 (9,3 °C) et 1991 d'ici 2020 (9,9°C); Période d'évaluation 01/1947 au 12/2021*)

Luxemburg befindet sich in der außertropischen Westwindzone, deren Wetterablauf von Zyklonen und Antizyklonen geprägt ist (Flohn, 1954). Dieser Übergangsbereich zwischen Seeklima und kühlem Kontinentalklima zählt nach Köppen (1936) zum warmgemäßigten Regenklima, bei dem die mittlere Temperatur des wärmsten Monats unter 22 °C und die des kältesten Monats über -3 °C bleibt. Damit liegt Luxemburg innerhalb des Übergangsklimas in einem überwiegend maritim geprägten Bereich mit allgemein kühlen Sommern und milden Wintern. Gelegentlich setzt sich kontinentaler Einfluss mit längeren Phasen hohen Luftdrucks durch. Dann kann es in den Sommermonaten bei schwachen östlichen bis südöstlichen Winden zu höheren Temperaturen und trockenem sommerlichen Wetter kommen. Im Winter sind kontinental geprägte Wetterlagen häufig mit Kälteperioden verbunden.

Die Jahresmitteltemperaturen für den Zeitraum 1947 bis 2021 für die Findel-Station sind in Abbildung 8 dargestellt. Das langjährige Mittel für den Bezugszeitraum 1961 bis 1990 beträgt 8,3 °C, 9,3 °C für 1981 bis 2010 und 9,9 °C für 1991 bis 2020. Der niedrigste Jahresmittelwert wurde 1956 mit 7,1 °C gemessen, der höchste Durchschnitt mit 11,3 °C im Jahr 2020. Seit etwa 1990 ist ein deutlicher Anstieg der Jahresmitteltemperaturen zu verzeichnen.

Abbildung 11 zeigt die einzelnen Monatsmittelwerte für die jeweiligen 30-jährigen Referenzzeiträume 1961 bis 1990 (links) und 1991 bis 2020 (rechts). Jeder Kreis steht für ein einzelnes Jahr, jeder der zwölf Kreissegmente für einen einzelnen Monat. Anhand der Farbcodierung sind auf der rechten Seite der Abbildung die deutlich niedrigeren Wintertemperaturen (weniger dunkelblaue Werte) und die höheren Lufttemperaturen in den Frühlingsmonaten (mehr rote Segmente) zu erkennen.

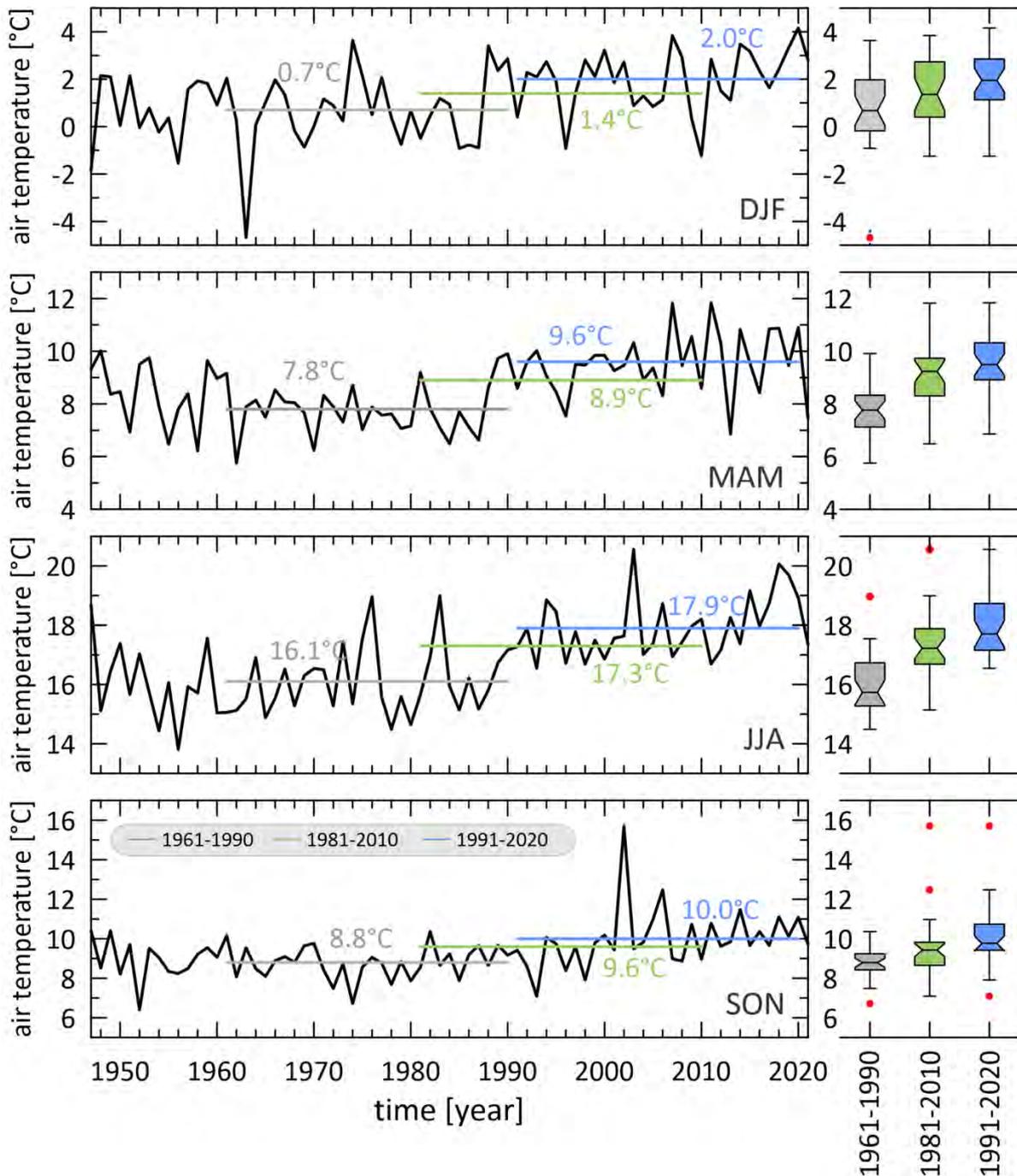


Abbildung 9: Maximale Lufttemperaturwerte für die meteorologischen Jahreszeiten (Winter = Dezember bis Februar, Frühling = März bis Mai, Sommer = Juni bis August, Herbst = September bis November) für die Station Findel (schwarze Linien) und Mittelwerte der drei Referenzzeiträume 1961 bis 1990 (grau), 1981 bis 2010 (grün) und 1991 bis 2020 (blau). Boxplots auf der rechten Seite der Abbildung zeigen die Verteilung innerhalb der drei Referenzperioden; Bewertungszeitraum 01/1947 bis 12/2021. (Valeurs maximales de température de l'air pour les saisons météorologiques (hiver = décembre à février, printemps = mars à mai, été = juin à août, automne = septembre à novembre) pour la station du Findel (lignes noires) et valeurs moyennes de la trois périodes de référence 1961 à 1990 (gris), 1981 à 2010 (vert) et 1991 à 2020 (bleu). Les boîtes à moustaches sur le côté droit de la figure montrent la répartition au sein des trois périodes de référence ; Période de cotisation 01/1947 au 12/2021)

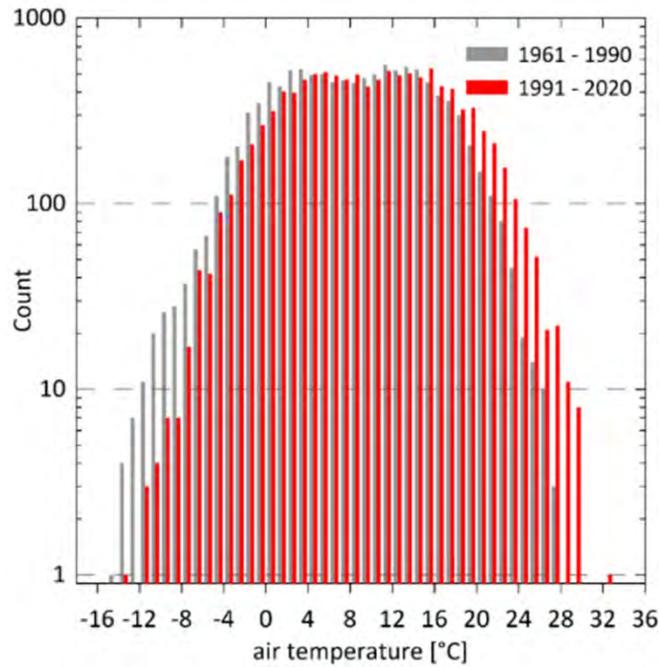


Abbildung 10: Absolute Häufigkeitsverteilung der stündlichen Lufttemperaturwerte, die an der Flughafenstation Findel für zwei Referenzperioden von 30 Jahren gemessen wurden (1961-1991: grau, 1991-2020 rot); Klassengröße = 1 °C. (Distribution statistique des valeurs horaires de température de l'air mesurées à la station aéroportuaire du Findel pendant deux périodes de référence de 30 ans (1961-1991 : gris, 1991-2020 rouge) ; Taille des classes = 1°C.)

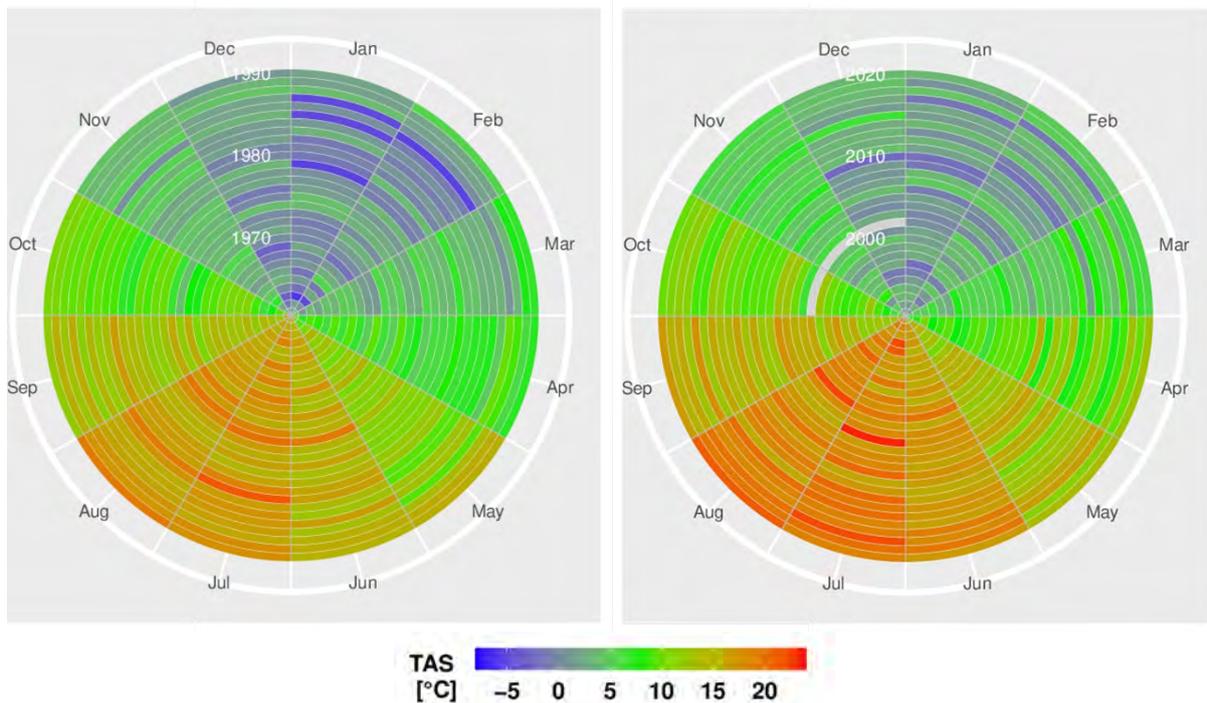


Abbildung 11: Monatliche mittlere Lufttemperaturwerte (TAS; Temperatur Luftoberfläche) für die Referenzzeiträume 1961 bis 1990 (links) und 1991 bis 2020 (rechts). Evaluationszeitraum 01/1961 bis 12/2020. Quelle: Junk et al. Jahresbericht CHAPEL-Projekt, 2023. (Valeurs mensuelles moyennes de la température de l'air (TAS ; température de la surface de l'air) pour les périodes de référence 1961 à 1990 (à gauche) et 1991 à 2020 (à droite). Période d'évaluation 01/1961 au 12/2020. Source : Junk et al., Rapport annuel du projet CHAPEL, 2023)



3.2 NIEDERSCHLAG

Die jährlichen Niederschlagssummen für die Findel-Station sind in Abbildung 12 dargestellt. Im Gegensatz zur Lufttemperatur zeigen die Mittelwerte der drei Referenzperioden keinen homogenen Trend. Nach einem Anstieg von 50 mm zwischen den 30-Jahres-Zeiträumen 1961 bis 1990 und 1981 bis 2010 kann zwischen 1981 und 2010 ein Rückgang um 66 mm beobachtet werden. Mit 541 mm war das Jahr 1976 das trockenste, 1988 mit 1202 mm das nasseste. Alle fünf Jahre zwischen 2017 und 2021 weisen Jahressummen unter 800 mm auf.

Abbildung 13 zeigt die Veränderungen der Niederschlagssummen in den meteorologischen Jahreszeiten. Für alle vier Jahreszeiten ist ein Rückgang von dem Referenzzeitraum 1981-2010 bis 1991-2020 zu beobachten, wobei er im Frühjahr und Herbst am deutlichsten ausgeprägt ist. Die Unterschiede zwischen den drei Bezugszeiträumen sind eher gering und statistisch nicht signifikant. Die absolute Häufigkeitsverteilung der stündlichen Niederschlagswerte ist in Abbildung 14 dargestellt. Die Veränderung hin zu höheren Werten ist weniger ausgeprägt als bei der Lufttemperatur, tritt aber im Zeitraum 1991 bis 2020 vermehrt auf.

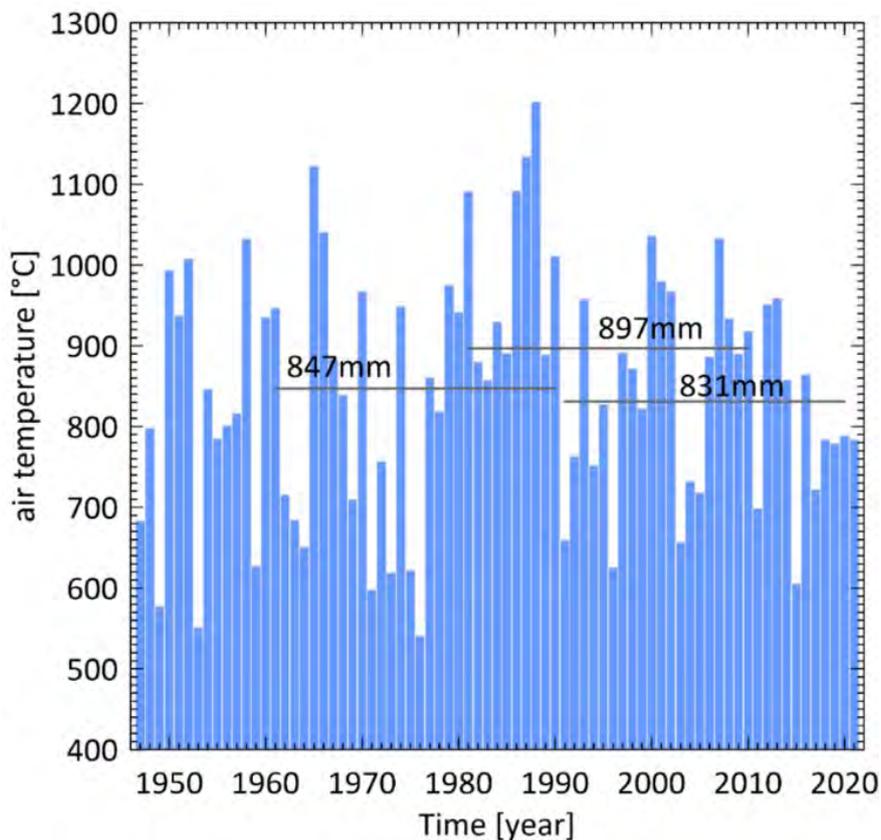


Abbildung 12: Jahresniederschlagswerte für die Station Findel; Auswertungszeitraum 01/1947 bis 12/2021. (Valeurs annuelles des précipitations pour la station du Findel ; Période d'évaluation 01/1947 au 12/2021)

Abbildung 15 schließlich zeigt analog zu den Lufttemperaturen die monatlichen Niederschlagssummen aller Monate der jeweiligen Referenzperioden. Obwohl die Unterschiede in den Jahreszeiten statistisch nicht signifikant sind, zeigt sich der Trend zu trockeneren Frühlings- und Sommermonaten besonders in den letzten beiden Jahrzehnten des Jahrhunderts.

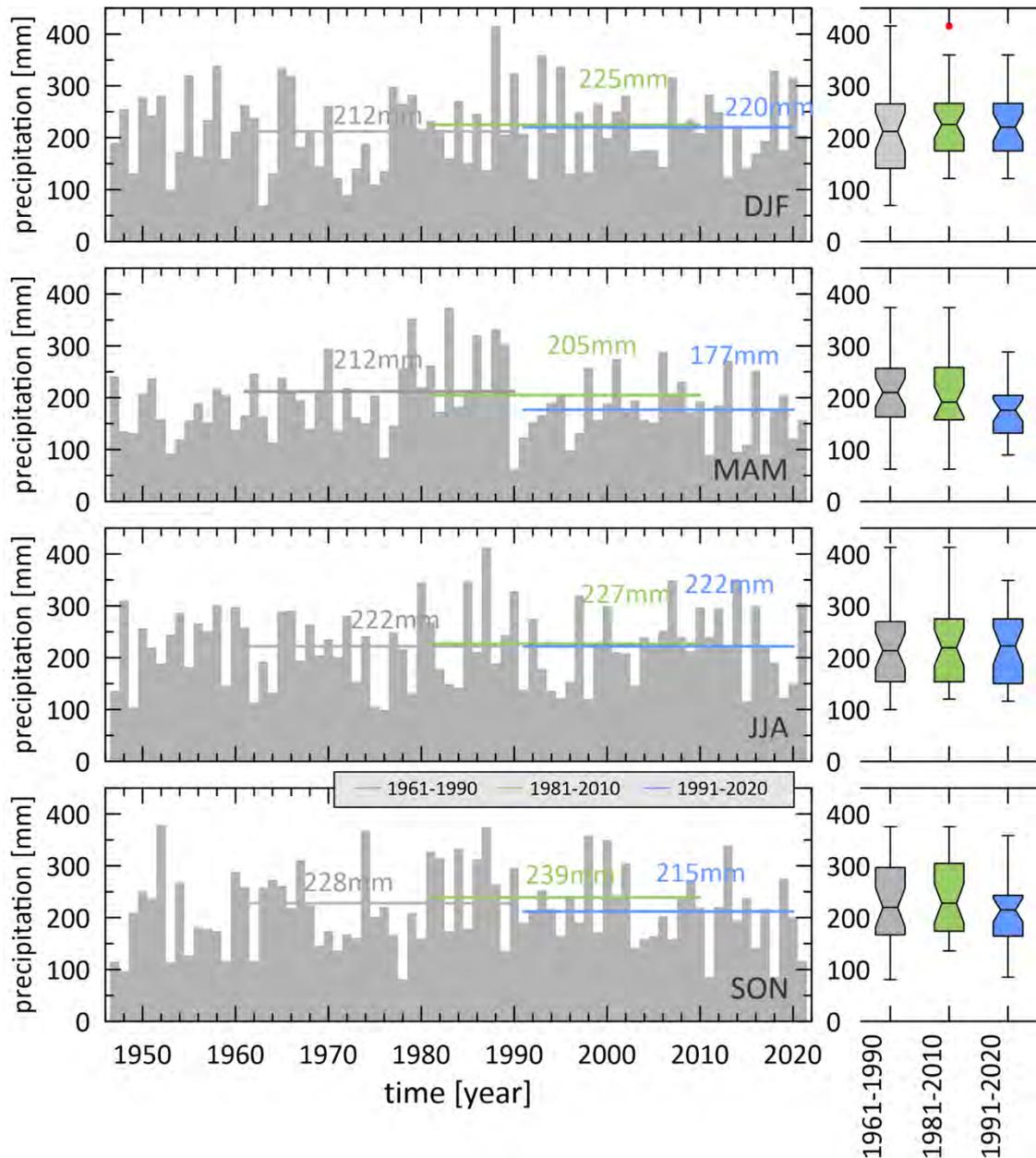


Abbildung 13: Niederschlagssummen für die meteorologischen Jahreszeiten (Winter = Dezember bis Februar, Frühling = März bis Mai, Sommer = Juni bis August, Herbst = September bis November) für die Station Findel und Mittelwerte der drei Referenzperioden 1961 bis 1990 (grau), 1981 bis 2010 (grün) und 1991 bis 2020 (blau). Boxplots auf der rechten Seite der Abbildung zeigen die Verteilung innerhalb der drei Referenzperioden; Auswertezitraum 01/1947 bis 12/2021. (Totaux de précipitations pour les saisons météorologiques (hiver = décembre à février, printemps = mars à mai, été = juin à août, automne = septembre à novembre) pour la station du Findel et valeurs moyennes pour les trois périodes de référence 1961 à 1990 (gris), 1981 à 2010 (vert) et 1991 à 2020 (bleu). Les boîtes à moustaches sur le côté droit de la figure montrent la répartition au sein des trois périodes de référence; Période d'évaluation 01/1947 au 12/2021)

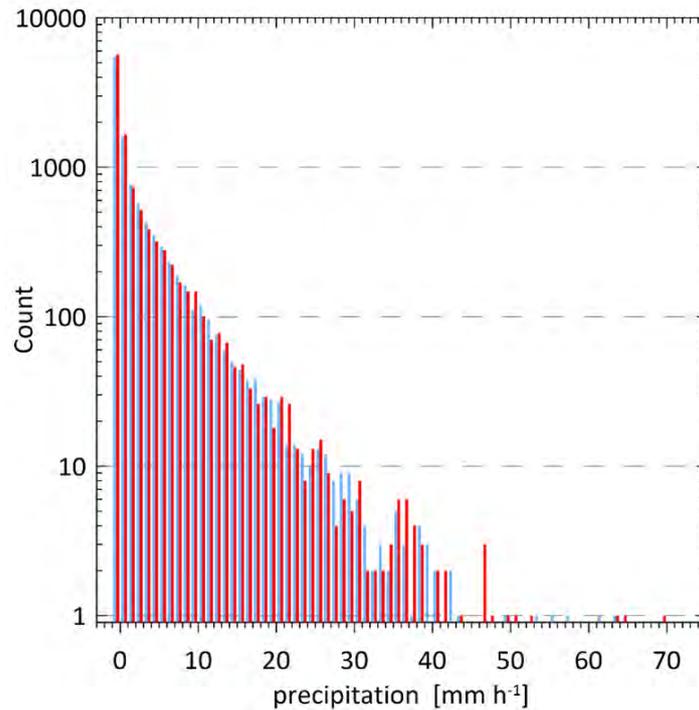


Abbildung 14: Absolute Häufigkeitsverteilung der stündlichen Niederschlagssummen, gemessen an der Flughafenstation Findel für zwei 30-jährige Referenzzeiträume (1961-1991:blau, 1991-2020 rot); Klassengröße = 1 mm. (*Distribution de fréquence absolue des cumuls horaires de précipitations, mesurés à la station aéroportuaire du Findel sur deux périodes de référence de 30 ans (1961-1991: bleu, 1991-2020 rouge); Taille de la classe = 1 mm*)

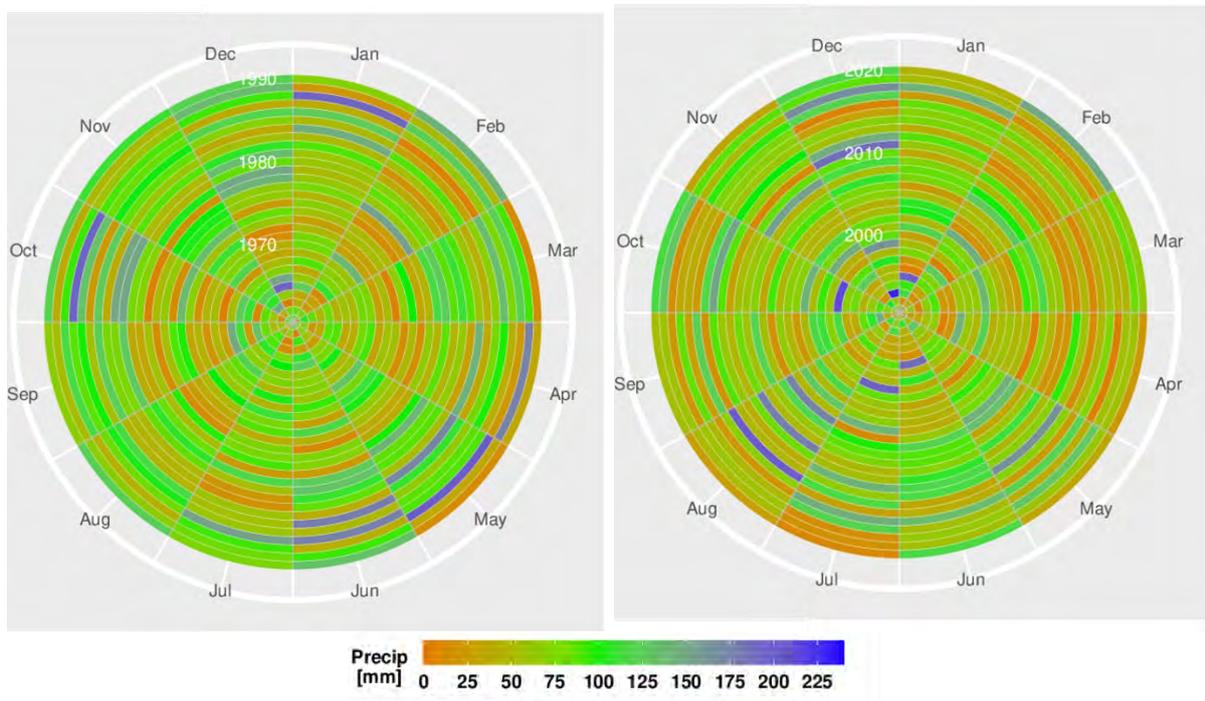


Abbildung 15: Monatsmittelwerte (Niederschlag) für die Referenzzeiträume 1961 bis 1990 (links) und 1991 bis 2020 (rechts). Auswertezeitraum 01/1961 bis 12/2020. (*Valeurs moyennes mensuelles (précipitations) pour les périodes de référence 1961 à 1990 (à gauche) et 1991 à 2020 (à droite). Période d'évaluation 01/1961 au 12/2020*)

An der MeteoLux-Messstation Flughafen Findel wurden neben Temperatur und Niederschlag unter anderem auch Windrichtung und Windgeschwindigkeit über einen langen Zeitraum gemessen. Diese Messstation dient



als Referenz für die Beurteilung der langjährigen mittleren Windverhältnisse des Landes. Die langjährige mittlere stündliche Windgeschwindigkeit liegt bei $5,9 \text{ m s}^{-1}$ (mäßige Brise), wobei auch regelmäßig starke Winde von über 10 m s^{-1} auftreten, – insbesondere in den Wintermonaten –. Der Wind weht ganzjährig bevorzugt aus nordöstlichen und west- bzw. südwestlichen Richtungen (Abbildung 16).

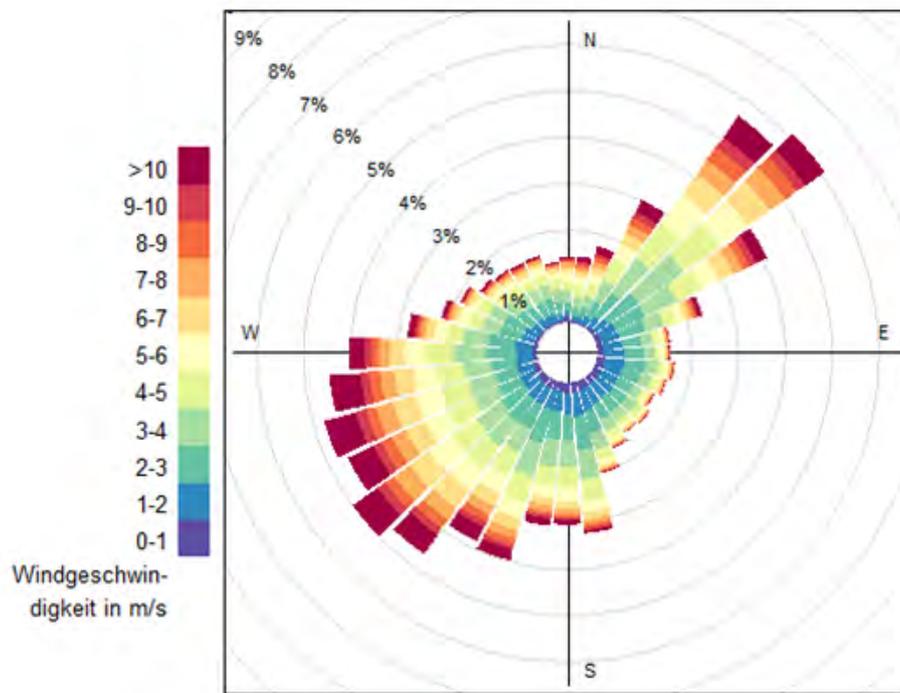


Abbildung 16: Windrichtungsverteilung in Luxemburg 2005 – 2019; Station: Luxemburg, Flughafen Findel (Datenquelle: MeteoLux 2020) (*Distribution de la direction du vent au Luxembourg 2005 - 2019; Station: Luxembourg, aéroport de Findel (Source de données: MeteoLux 2020)*)

3.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

Die Klimaanalyse für die Region Pro Sud legt einen so genannten „autochthonen Sommertag“ (wolkenloser Himmel, nur sehr schwach überlagernder synoptischer Wind) als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde (vgl. Kapitel 4.2.1). Verbunden mit dieser autochthonen Wetterlage ist das Auftreten einer windschwachen Strahlungsnacht, in welcher die nächtliche Ausstrahlung aufgrund der fehlenden Bewölkung deutliche Temperaturunterschiede im Gebiet erzeugt.

In Luxemburg treten im langjährigen Mittel rund 28 windschwache Strahlungsnächte² auf, wobei im Sommerhalbjahr und besonders im August die Häufigkeit am größten ist (Abbildung 17). Wichtig ist hier festzuhalten, dass die Ermittlung der langjährigen mittleren Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten anhand von Da-

¹ bezogen auf den Messzeitraum 2005-2019, für den die Daten bereitgestellt wurden

² Die Voraussetzungen für windschwache Strahlungsnächte sind nach DWD (1997) eine Höchstwindgeschwindigkeit von $2,7 \text{ m/s}$ bei gleichzeitig geringer Bewölkung (Bedeckungsgrad höchstens 4 Achtel) während mehrerer Nachtstunden. In der Regel müssen diese Kriterien für 10 Stunden innerhalb des Zeitraums zwischen 17 MEZ und 5 MEZ erfüllt sein, (d. h. es kann dazwischen eine Lücke auftreten), oder an 7 aufeinanderfolgenden Stunden innerhalb dieses Zeitraums, also ohne Lücke. Falls der Bedeckungsgrad nicht vorliegt, muss an exakt den gleichen Stunden eine Temperaturabnahme von mindestens $0,3 \text{ K/h}$ erfolgt sein.



ten der Station Flughafen Findel ermittelt wurde. Diese Station befindet sich jedoch außerhalb der Stadt Luxemburg und in einer sehr windexponierten Lage. Demzufolge werden an diesem Standort besonders hohe Windgeschwindigkeiten und damit wenig austauschbare Bedingungen gemessen. Es ist davon auszugehen, dass in den verdichteten Siedlungskörpern Luxemburgs die Auftrittshäufigkeit dieser lokalen Wetterlagen wesentlich höher ist.

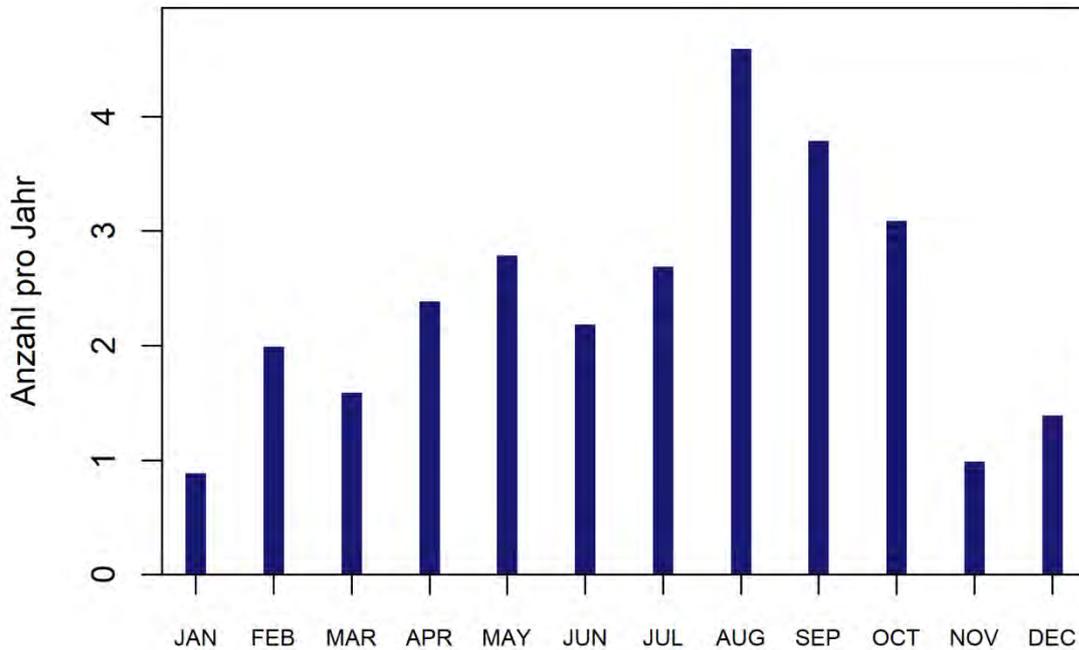


Abbildung 17: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an autochthonen Nächten (28,2 pro Jahr) an der Station Luxemburg, Flughafen Findel (2005-2019) (*Nombre mensuel moyen de nuits autochtones à long terme (28,2 par an) à la station de Luxembourg, aéroport de Findel (2005-2019)*)

In der im Rahmen dieser Arbeit modellierten Situation handelt es sich um einen Fall, der eine durchschnittliche Sommersituation an einem Tag (keine extreme Sommerhitze über mehrere Tage) bei wolkenlosem Himmel repräsentieren soll. Die sich ausprägenden Lufttemperaturen entsprechen einem moderaten sommerlichen Niveau, um eine Situation abzubilden, die verhältnismäßig häufig auftreten kann. Ein mittlerer autochthoner Sommertag in Luxemburg hat eine Tagesdurchschnittstemperatur von rund 20,3 °C³. In der Abbildung 18 ist ein beispielhafter Tagesgang⁴ dargestellt, der ein Temperaturniveau zeigt, welches ungefähr diesem Durchschnittswert entspricht. Um 4 Uhr nachts des 7.8.2013 hat sich die Luft an der Station Flughafen Findel auf 16,5 °C abgekühlt. Die Modellergebnisse der Nachtsituation – ebenfalls 4 Uhr – zeigen (vgl. Kapitel 5.1), dass im Umfeld der Klimastation Temperaturen im Bereich von 16-17 °C erreicht werden. Insofern ergibt sich für die modellierte Situation ein repräsentatives Temperaturniveau, welches gut mit den gemessenen Werten übereinstimmt. Zu beachten ist jedoch, dass die sich während autochthoner Bedingungen einstellenden relativen Unterschiede zwischen den verschiedenen Landnutzungen wichtiger sind als das absolute Temperaturniveau. In der Planungshinweiskarte (vgl. Kapitel 6) werden aus diesem Grund die Siedlungs- und Verkehrsflächen auf der Basis der relativen Unterschiede zwischen den einzelnen Flächen bewertet.

³ bezogen auf die Messwerte der Station Flughafen Findel in den Sommermonaten Juni, Juli, August im Zeitraum 2005-2019

⁴ Da u.a. der Bedeckungsgrad im Tagesverlauf nicht durchgängig 0/8 entsprach, ergeben sich Unregelmäßigkeiten im Tagesgang der Temperatur (z.B. verhältnismäßig niedrige Temperatur um 14 Uhr).

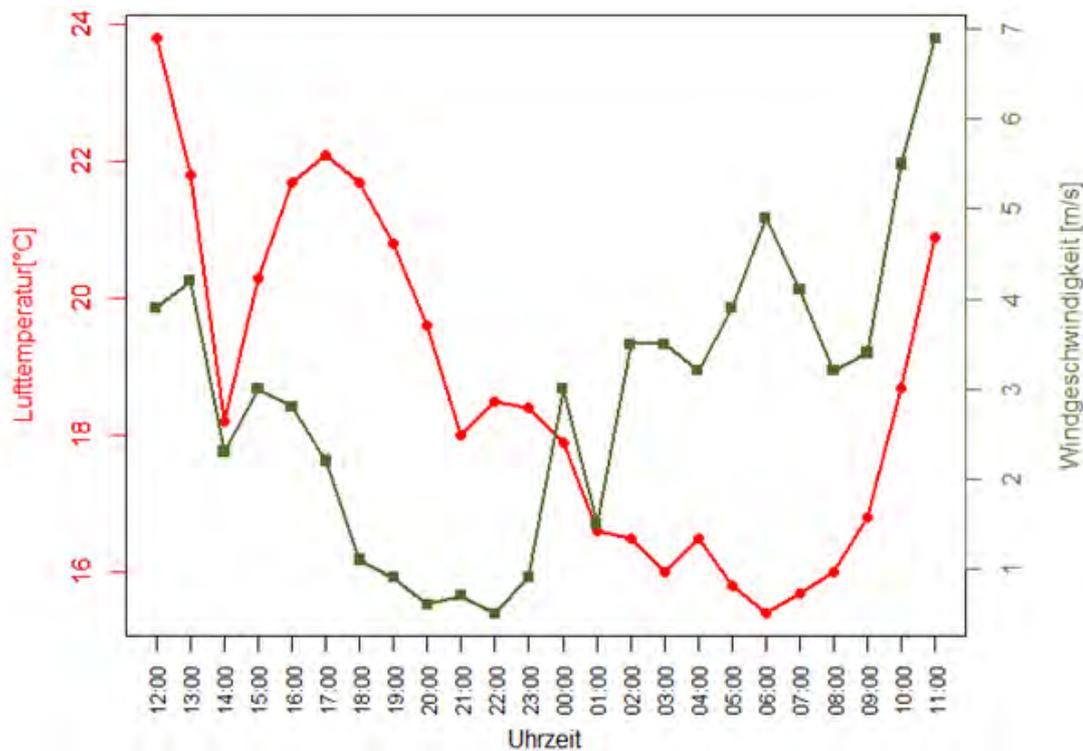


Abbildung 18: Tagesgang der Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit an einem mittleren (autochthonen) Sommertag: Beispiel des 6./7. August 2013, gemessen an der Station Luxemburg, Flughafen Findel (*Variation diurne de la température de l'air et de la vitesse du vent lors d'une journée moyenne (autochtone) d'été: exemple des 6/7 août 2013, mesurée à la station Luxembourg, aéroport de Findel*)

Die Windrichtungsverteilung um 4 Uhr nachts während austauscharmer Strahlungswetterlagen (Abbildung 19) ähnelt der Verteilung der langjährigen mittleren Windverhältnisse aller Wetterlagen und Zeitpunkte (Abbildung 16). Demnach treten auch in autochthonen Sommernächten Winde aus Nordosten am häufigsten auf. Winde aus südwestlicher Richtung wurden am zweithäufigsten gemessen. In den Modellergebnissen (vgl. Kapitel 5.2) ist im Umfeld der Messstation die häufigste Strömungsrichtung aus Nordosten wiederzufinden. Das Relief am Flughafen Findel ist abfallend von Nordost nach Südwest, sodass sich während autochthoner Sommernächte Hangwinde aus nordöstlicher Richtung ausbilden können.

Die Windgeschwindigkeiten in autochthonen Sommernächten fallen erwartungsgemäß niedriger aus als bei anderen Wetterlagen. Vereinzelt treten zwar auch Windgeschwindigkeiten von 7-8 m/s auf, in den meisten Fällen betragen sie jedoch unter 2,7 m/s (Abbildung 19). Da die Windgeschwindigkeiten in 10 m ü. Gr. gemessen werden und die Modellergebnisse auf einer Höhe von 2 m ü. Gr. basieren, ist ein direkter Vergleich der Windgeschwindigkeiten nicht möglich. Es zeigt sich aber, dass die modellierte Windgeschwindigkeit in 2 m ü. Gr. erwartungsgemäß niedriger ausfällt als die gemessene mittlere Strömung in 10 m über dem Boden.

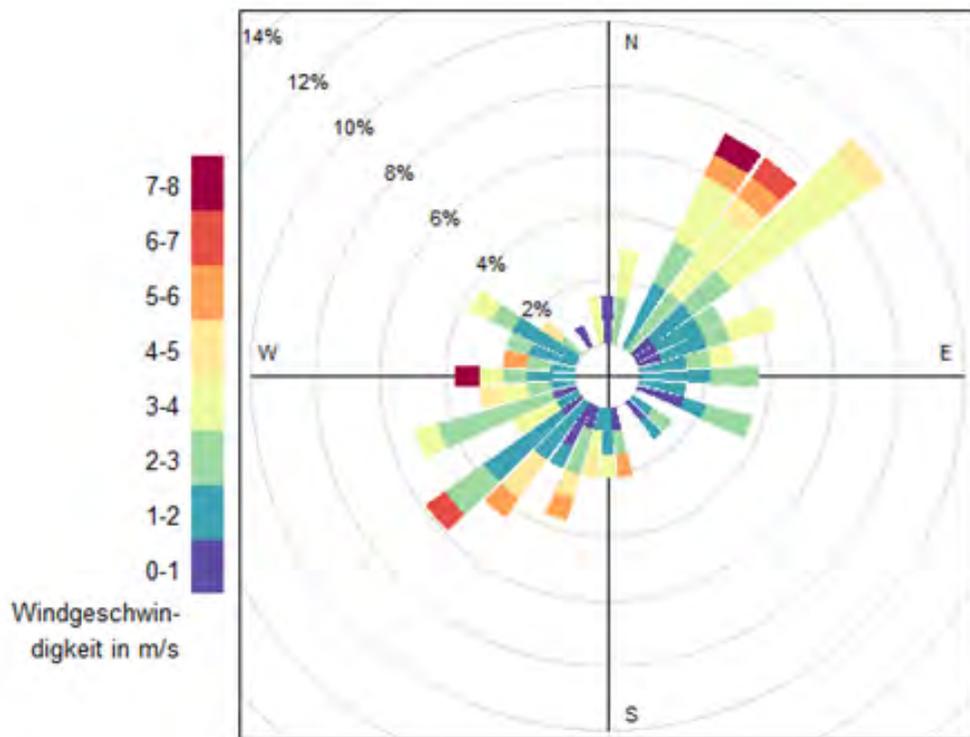


Abbildung 19: Windrichtungsverteilung um 4 Uhr nachts während autochthoner Wetterlagen im Sommer 2005 – 2019; Station: Luxemburg, Flughafen Findel (Datenquelle: MeteoLux 2020) (*Distribution de la direction du vent à 4 heures du matin pendant les conditions météorologiques autochtones en été 2005 - 2019; station: Luxembourg, aéroport de Findel (Source de données: MeteoLux 2020)*)

3.4 DAS ZUKÜNFTIGE KLIMA IN LUXEMBURG

Für die Analyse des zukünftigen Klimas sind lange, simulationsbasierte Zeitreihen meteorologischer Daten notwendig. Es werden Zeitreihen, basierend auf einem Multi-Modell-Ensemble von regionalen Klimaprojektionen aus dem Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP) verwendet.

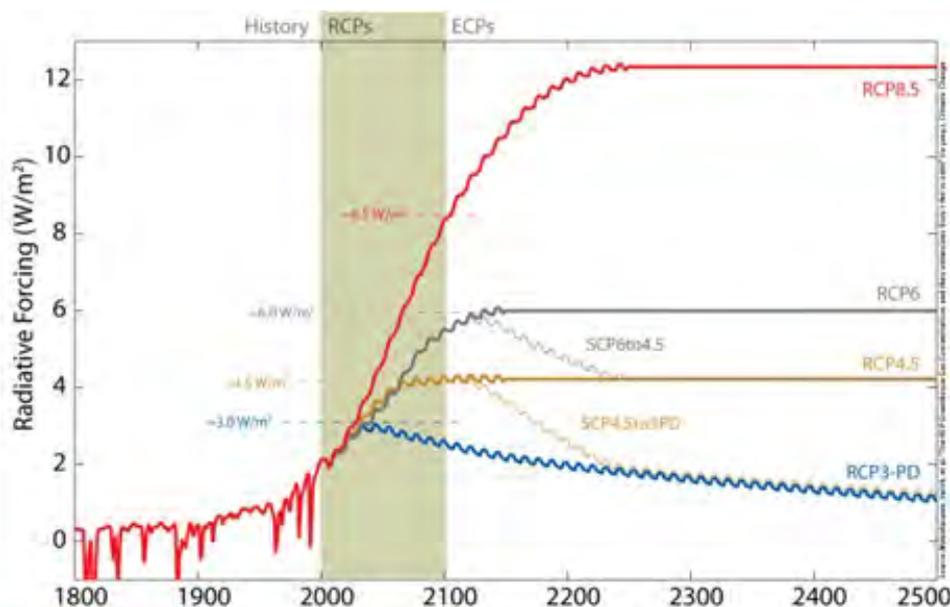


Abbildung 20: Globaler anthropogener Strahlungsantrieb für verschiedene Emissionsszenarien (RCP85, RCP6, RCP45, RCP3-PD), (IPCC, AR4).



Für das ClimProSud Projekt wurden Zeitreihen der täglichen mittleren, maximalen und minimalen Lufttemperatur für Luxemburg (49°36' N 6°7' E) für das RCP45 extrahiert. Dabei werden die Daten einer 2 x 2 Gitterbox verwendet, die einer Fläche von 252 km² entsprechen und im nächsten Schritt räumlich gemittelt werden. Da für die Antriebsdaten der FITNAH Modellierung absolute Werte notwendig sind und der Output von regionalen Klimaprojektionen immer mit systematischen Unsicherheiten behaftet sind, wurden die Datenreihen einer Bias-Korrektur unterzogen. Die statistischen Details, sowie eine ausführliche Validierung zu diesem Verfahren können den öffentlich zugänglichen Jahres -Berichten des CHAPEL Projektes entnommen werden.

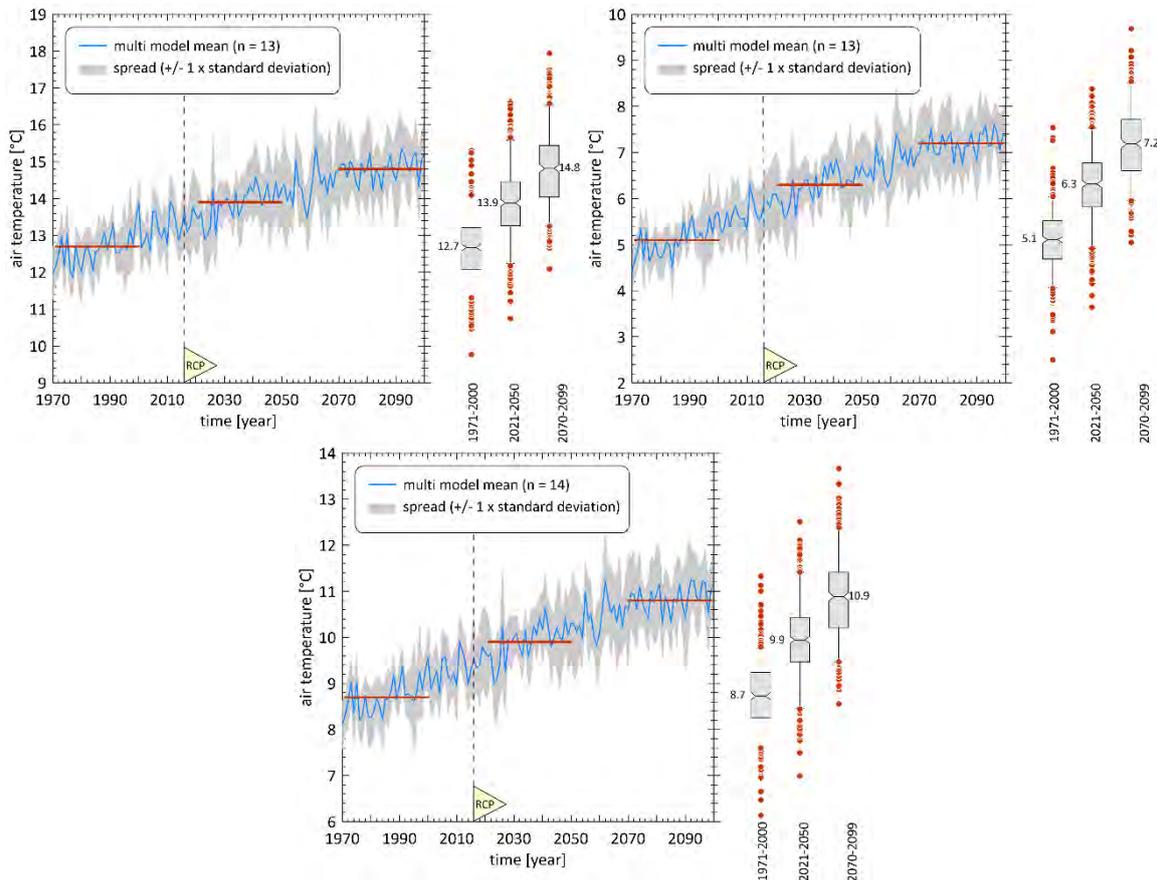


Abbildung 21: Linke Seite jeder Abbildung: Zeitreihe des Multi-Modell-Ensembles der maximalen jährlichen (a), minimalen jährlichen (b) und mittleren jährlichen Lufttemperatur (c) für den RCP45. Die Streuung (grau schattierter Bereich) wird über +/- eine Standardabweichung des Ensembles definiert. Zusätzlich werden die Mittelwerte der 30-Jahres-Zeitscheibe (Referenzzeitraum (REF) 1971-1990, nahe Zukunft (NF) 2021-2050 und ferne Zukunft (FF) 2070-2099) als rote Linien dargestellt. Rechte Seite der Abbildung: Boxplots der Tageswerte von für REF, NF und FF. Die Whisker erstrecken sich bis zum 1,5-fachen Interquartilsbereich. Daten außerhalb werden als einzelne rote Punkte dargestellt.

Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse für das RCP4.5 Szenario. Es handelt sich um ein Stabilisierungsszenario, was bedeutet, dass sich der Strahlungsantrieb vor 2100 aufgrund des Einsatzes einer Reihe von Technologien und Strategien zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen bei 4,5 W/m² stabilisiert. Der prognostizierte Anstieg der bodennahen Lufttemperaturen bis zum Ende dieses Jahrhunderts beträgt 2,1°C für minimale und maximale Jahrestemperaturen und 2,2°C für die Jahresmitteltemperatur. In Absprache mit dem Auftraggeber wurden als Antriebsdaten für die FITNAH Modellierungen nicht die Mittelwerte, sondern die 25% und 75% Mediane verwendet (vgl. Kapitel 4.1.1).



3.5 ERGEBNISSE DER SONDERMESSUNGEN

Stationäre Messungen

Um die Modellergebnisse durch in-situ Beobachtungen zu ergänzen und zu validieren, wurden sowohl stationäre als auch mobile Sondermessungen der Lufttemperatur vorgenommen. In den Gemeinden Kayl, Diferdange und Esch-zur-Alzette wurden auf Grünflächen im Stadtrandgebiet sowie im versiegelten Stadtzentrum Lufttemperaturgeber mit passiv belüftetem Strahlungsschutz auf einer Höhe von 2 m installiert (insgesamt 6 Messpunkte). Diese stationären Sondermessungen erfolgten über einen Zeitraum von einem Jahr (26.6.2023 – 22.05.2024) mit einer Zeitauflösung von 2 Minuten. Abbildung 22 zeigt die Messergebnisse (maximale Differenz der Tagesmittelwerte, maximale Differenz der stündlichen Werte sowie stündliche Mittelwerte) beispielhaft für die zwei Sondermessstationen in Esch-zur-Alzette. Die maximalen Differenzen der Tagesmittelwerte schwanken zwischen 0,7°C und 2,3°C und die der stündlichen Werte bewegen sich im Bereich von 0,7°C und 5,3°C. Die Temperaturunterschiede waren in den Monaten November/Dezember 2023 und in der ersten Januarhälfte 2024 am niedrigsten. Hingegen sind im Juli, August, September und Oktober 2023 sowie Februar, März, April und Mai 2024 anhand der höheren Lufttemperaturunterschiede zwischen Innenstadt und Ellergronn deutliche städtische Wärmeinseleffekte zu beobachten. Die stärkste Ausprägung wurde Anfang September 2023 gemessen. In den Frühjahrs-, Sommer- und Herbstmonaten fällt der Wärmeinseleffekt oft mit erhöhten Lufttemperaturen zusammen, während der Wärmeinseleffekt im Winter (z.B. Januar 2024) durch ungehinderte Einstrahlung tagsüber verbunden mit niedrigen Lufttemperaturen entstand.

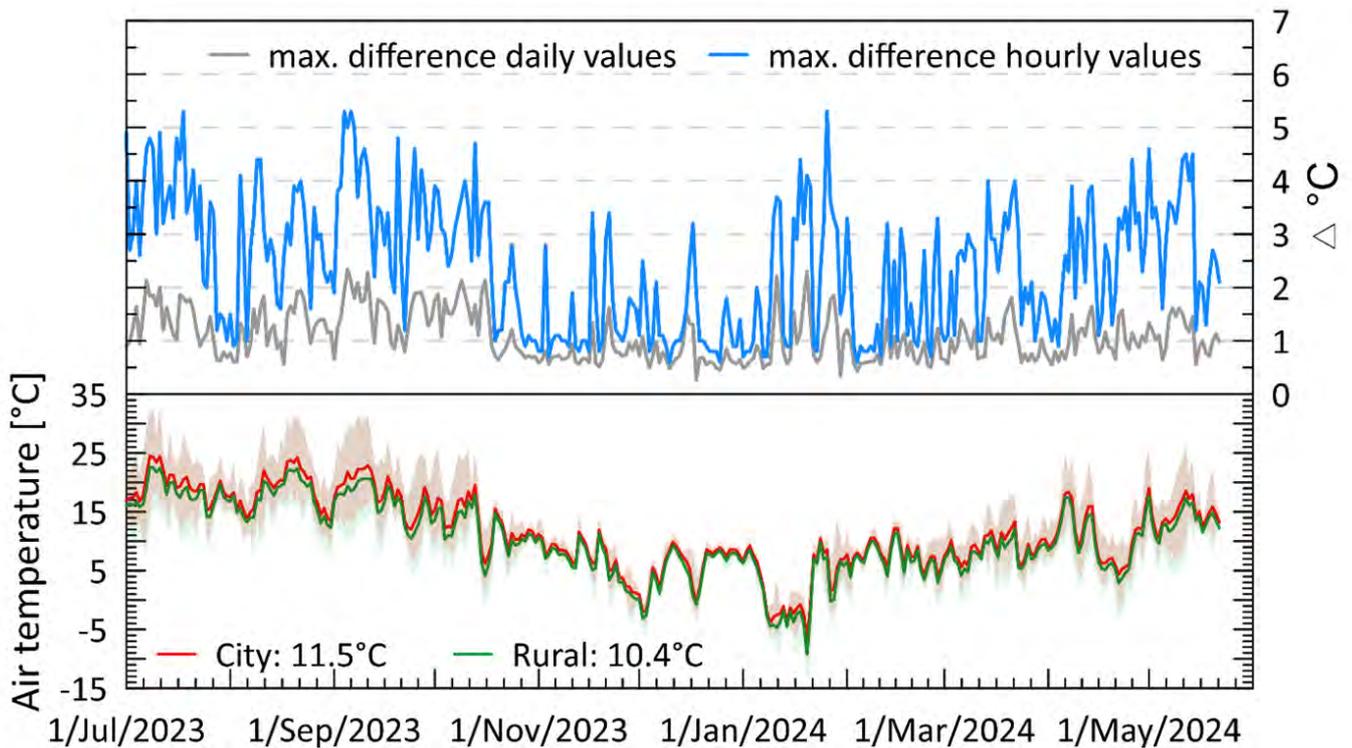


Abbildung 22: Oberes Bild: Maximale Differenz der Tagesmittelwerte und maximale Differenz der stündlichen Werte der gemessenen Lufttemperatur, Unteres Bild: stündliche Mittelwerte der Lufttemperatur für die zwei Sondermessstationen in Esch-zur-Alzette (Ellergronn (rural) und Stadtmitte gegenüber Bahnhof, Bd John Fitzgerald Kennedy) für den Zeitraum von 26.6.2023 bis 22.05.2024. Schattierte Flächen in der unteren Abbildung zeigen stündliche Minimal- und Maximalwerte.



Mobile Messfahrten

Neben stationären Messungen mittels Wetterstationen können horizontale Profilmessfahrten die meteorologischen Daten des stationären Messnetzes sinnvoll ergänzen. Hierzu wurde mit dem speziell ausgerüsteten Umweltmesswagen des LIST die Lufttemperatur und -feuchte entlang zuvor definierter Routen in Differdange und Esch-Zur-Alzette aufgezeichnet. Der Umweltmesswagen ist mit zwei aktiv belüfteten Psychrometern zur Messung der Trocken- und Feuchttemperatur ausgestattet. Somit können flächenhafte Informationen der der Temperaturverteilung in einer Stadt erfasst werden. Von besonderem Interesse hierfür sind autochthone Wetterlagen, da dann die Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland besonders deutlich ausgeprägt sind. Der städtische Wärmeineffekt ist typischerweise nachts am stärksten ausgebildet, daher wurden die Messungen zwischen 22:00 und 05:00 durchgeführt. Abbildung 23 zeigt beispielhaft die Ergebnisse einer nächtlichen Profilmessfahrt in Esch-zur-Alzette am 1. Februar 2024 (22:12 – 22:41 Uhr) mit Start- und Endpunkt Ellergronn. Der maximal gemessene Temperaturunterschied zwischen Grünfläche und Stadtzentrum beträgt 4°C. Der Temperaturunterschied zwischen Start- und Endzeit im Ellergronn betrug 0,3°C, so dass die gemessenen Differenzen zwischen Stadtzentrum und Ellergronn hauptsächlich dem Wärmeineffekt zugeordnet werden können.

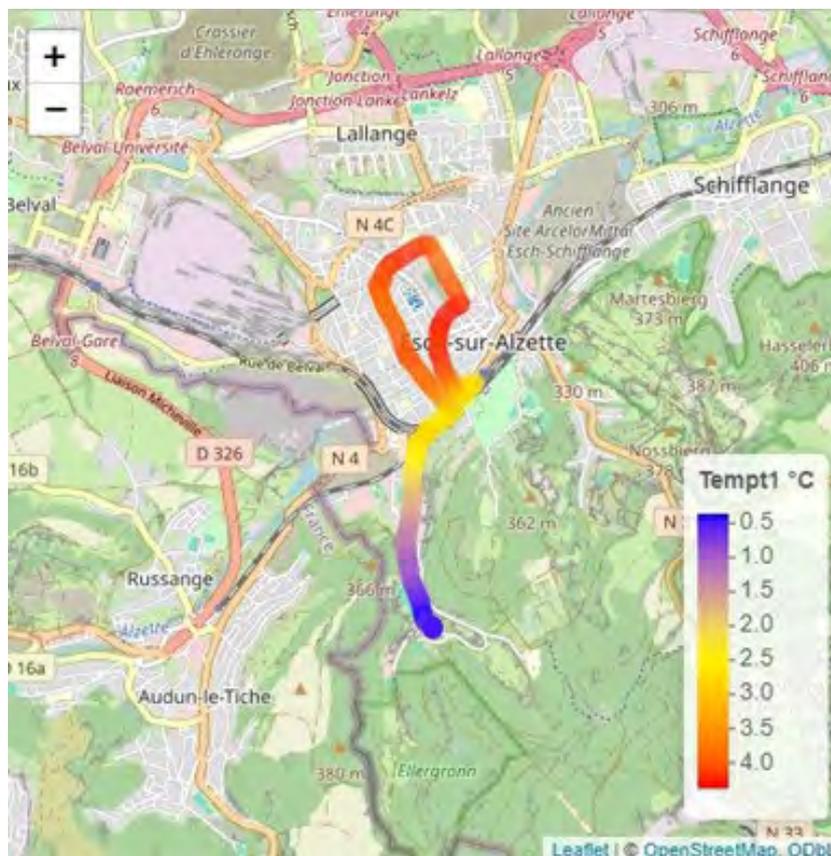


Abbildung 23: Ergebnisse einer nächtlichen Profilmessfahrt in Esch-zur-Alzette am 1. Februar 2024 (22:12 – 22:41 Uhr) mit Start- und Endpunkt Ellergronn. Die Temperaturskala zeigt gemessene Lufttemperaturen (Temp1) im Bereich von 0,37 °C und 4,4 °C.



4. Analysemethoden

4.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die Produkte der vorliegenden Stadtklimaanalysen basieren auf numerischen Modellsimulationen. Eingesetzt wurde das etablierte hochaufgelöste Stadtklimamodell FITNAH-3D. Die Grundgleichungen von FITNAH sind in der Literatur beschrieben (Groß 1992). Seit der Veröffentlichung zum Basismodell in den 1990er Jahren wurde FITNAH in einer Kooperation zwischen Prof. Günter Groß und der GEO-NET Umweltconsulting GmbH fortlaufend durch neue Funktionen, Module und Auswerteroutinen weiterentwickelt (u.a. Groß 2002, Groß et al. 2002, Groß 2012a, Groß 2012b, Groß 2013, Groß 2017).

Das Grundgerüst des dreidimensionalen Modells FITNAH besteht aus den Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innerer Energie sowie Bilanzgleichungen für Feuchtekomponenten und Luftbeimengungen. Die verschiedenen turbulenten Flüsse werden mit Hilfe empirischer Ansätze mit den berechenbaren mittleren Größen verknüpft. Der dabei auftretende turbulente Diffusionskoeffizient wird aus der turbulenten kinetischen Energie berechnet, für die eine zusätzliche Gleichung gelöst wird.

Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse werden über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität des Wasserdampfes in der Luft berücksichtigt wird. Bei detaillierten Simulationen im realen Gelände müssen neben der Orographie insbesondere der Einfluss von Wäldern und urbanen Strukturen auf die Verteilung der meteorologischen Größen realitätsnah berücksichtigt werden. Hierzu sind in FITNAH besondere Parametrisierungen vorgesehen.

Ein Wald oder Baumbestand findet über bestandsspezifische Größen wie Baumhöhe oder Bestandsdichte Eingang in das Modell. Damit gelingt es u.a., die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im Kronenbereich und die starke nächtliche Abkühlung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit verfügbaren Beobachtungen zu simulieren. Unter Berücksichtigung der stadtspezifischen Größen Gebäudehöhe, Versiegelungs- sowie Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (vgl. Groß 1987).

Das gesamte Gleichungssystem einschließlich der Parametrisierungen wird in ein dem Gelände folgendes Koordinatensystem transformiert. Damit gelingt es insbesondere, die Randbedingungen der verschiedenen meteorologischen Größen am unteren Rand, dem Erdboden, problemspezifisch zu formulieren. Die Berechnung der Erdoberflächentemperatur erfolgt über eine Energiestrom-Bilanz, bei der fühlbarer und latenter Wärmestrom, der Bodenwärmestrom, kurz- und langwellige Strahlungskomponenten sowie der anthropogene Wärmestrom Berücksichtigung finden.

Die Lösung der physikalischen Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Gitter. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. FITNAH-3D erfüllt die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl.7 (VDI 2015) definierten Standards für mesoskalige Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern.

Die Anwendungsbereiche von FITNAH reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamtstädtische und regionale/kantonale Klimaanalysen bis hin zu sehr großräumigen Anwendungen für ganze Bundesländer oder Staaten. Die horizontale Auflösung in einem regelmäßigen Gitter reicht dabei von 5 m bis 200 m. Die vertikale Gitterweite ist nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40



und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Relief und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Modellanwendungen mit FITNAH 3D benötigen spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Informationen in der jeweils gewählten Auflösung vorliegen:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung / Versiegelungsgrad
- Strukturhöhe

Grundsätzlich gilt dabei, dass je höher die horizontale räumliche Auflösung ist, desto mehr Details der Erdoberfläche können im Modell berücksichtigt werden und desto hochwertiger sind die Modellergebnisse. Den limitierenden Faktor stellt dabei nicht die Größe des zu untersuchenden Modellgebietes, sondern einzig die Rechenzeit dar. Die Wahl der „richtigen“ Modellauflösung muss also stets über eine Abwägung zwischen der zu erfüllenden Analyseaufgabe, den bereitgestellten zeitlichen und sonstigen Ressourcen sowie den zur Verfügung stehenden Eingangsdaten erfolgen.

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 5 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet der Region Pro-Sud und angrenzendes Umland rd. 30,8 Mio. Rasterzellen. Entsprechend große Gebäude- und Grünstrukturen werden dabei explizit aufgelöst. Es handelt sich demzufolge um einen Modellansatz am Übergangsbereich von der Meso- zur Mikroskala. Mit dieser Auflösung lassen sich alle für gesamtstädtische und quartiersbezogene Fragestellungen relevanten Aussagen ableiten.

Tabelle 3: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5-10 m.

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
1	Gebäude	individuell
2	unbebaut versiegelt	0
3	Gewässer	0
4	Gleisfläche	0
5	Freiland, niedrige Vegetation	0,5
6	Sand, Geröll	
7	Baum über Versiegelung	individuell
8	Baum über Freiland	individuell
9	naturferner Boden*	0,5
10	Baum auf naturfernem Boden	individuell

* naturferne Böden sind anthropogen stark überprägte, aber unbebaute städtische Oberflächen

Mit Blick auf die benötigten Eingangsdaten besteht bei der gewählten hohen Auflösung erfahrungsgemäß die größte Herausforderung in der Erzeugung des Landnutzungsrasters und der Zuweisung einer individuellen Höheninformation. Das Raster sollte die reale Hauptnutzung innerhalb einer 25 m² großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 5 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden



werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.

Abbildung 24 zeigt zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmäßig als meteorologische Randbedingung verwendet werden. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, unbebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – zeigen grundsätzliche ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an unbebaut versiegelten Oberflächen auf. Sie haben die größte Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04:00 morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter dem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen.

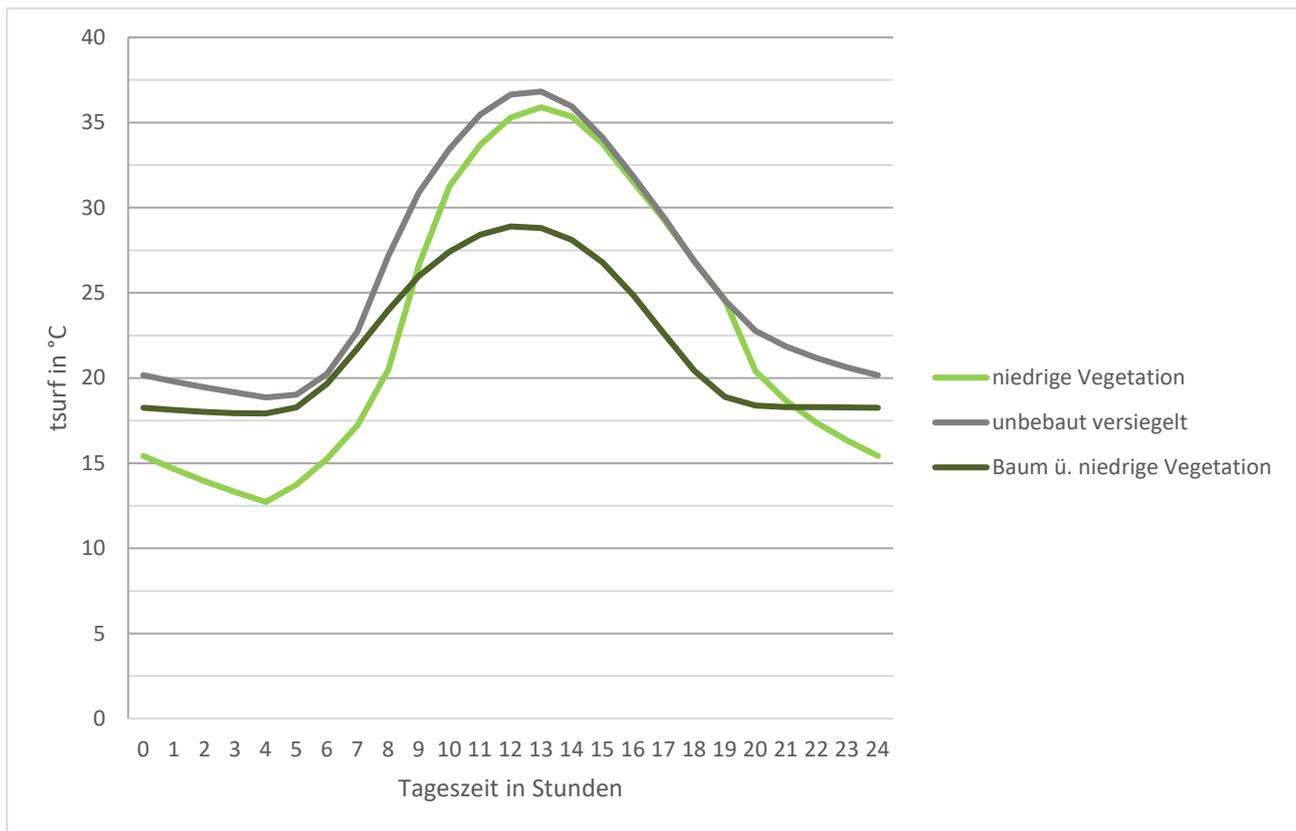


Abbildung 24: typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ('Tsurf') für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D

Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Grad Celsius (°C) über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige °C unter der unbebaut versiegelten Oberfläche liegt. Diese idealtypischen Muster werden im gesamtstädtischen Kontext durch komplexe lokalklimatische Effekte (nachbarschaftliche Wirkungen, horizontale und vertikale



Strömungsprozesse) überprägt und können sich somit im konkreten räumlichen Fall auch (komplett) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

Im Hinblick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten ist im Modell zu beachten, dass sich diese in der Realität über längere Zeiträume einstellen, also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlicher langsamer auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen reagieren als die Lufttemperatur. In Trockenzeiten sinkt die Bodenfeuchte je nach Ausgangsniveau also erst im Verlauf mehrerer Tage oder Wochen unter den Welkepunkt des Stadtgrüns ab, während sich spürbare Änderungen der Lufttemperatur innerhalb von Stunden ergeben. Daraus folgt, dass die Bodenfeuchte in einem modellierten Tagesgang nicht explizit berechnet werden kann, sondern vorgegeben werden muss. Standardmäßig liegt die Bodenfeuchte deutlich über dem Welkepunkt. Es wird also eine Situation vorgegeben, in der die Stadtvegetation weitgehend optimal verdunsten kann. Dies führt tagsüber dazu, dass die kurzweilige Einstrahlung zu einem Teil nicht in fühlbare Wärme (vereinfacht ausgedrückt also in eine Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur) umgewandelt wird, sondern für die Verdunstung aufgewendet wird und sich damit als latenter Energiefluss nicht temperaturerhöhend auswirkt. Wie Abbildung 25 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 K gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 K) wärmer. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass die Unterschiede zwischen einem trockenem und einem feuchten Boden mit demselben Bewuchs bei Weitem nicht so groß sind, wie die Unterschiede der beiden Bodenfeuchtevarianten zu asphaltierten Flächen. Hier ergeben sich im Maximum Abweichung von 6-7 K und die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen. In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzweiligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

Ähnlich wie für die Bodenfeuchte gilt für das vertikale Stadtgrün, dass dessen Vitalität sich über längere Zeiträume entwickelt und die klimatisch-meteorologischen Aspekte lediglich einen Teil des Gesamtwirkungskomplexes darstellen. Insofern muss im Modell – zumeist im Rahmen von Szenarien-Betrachtungen oder Sensitivitätsstudien – vorgegeben werden, was mit dem Bestandsgrün im Falle einer Trockenperiode bzw. einer sich klimawandelbedingt verstärkenden Sommertrockenheit passieren soll.

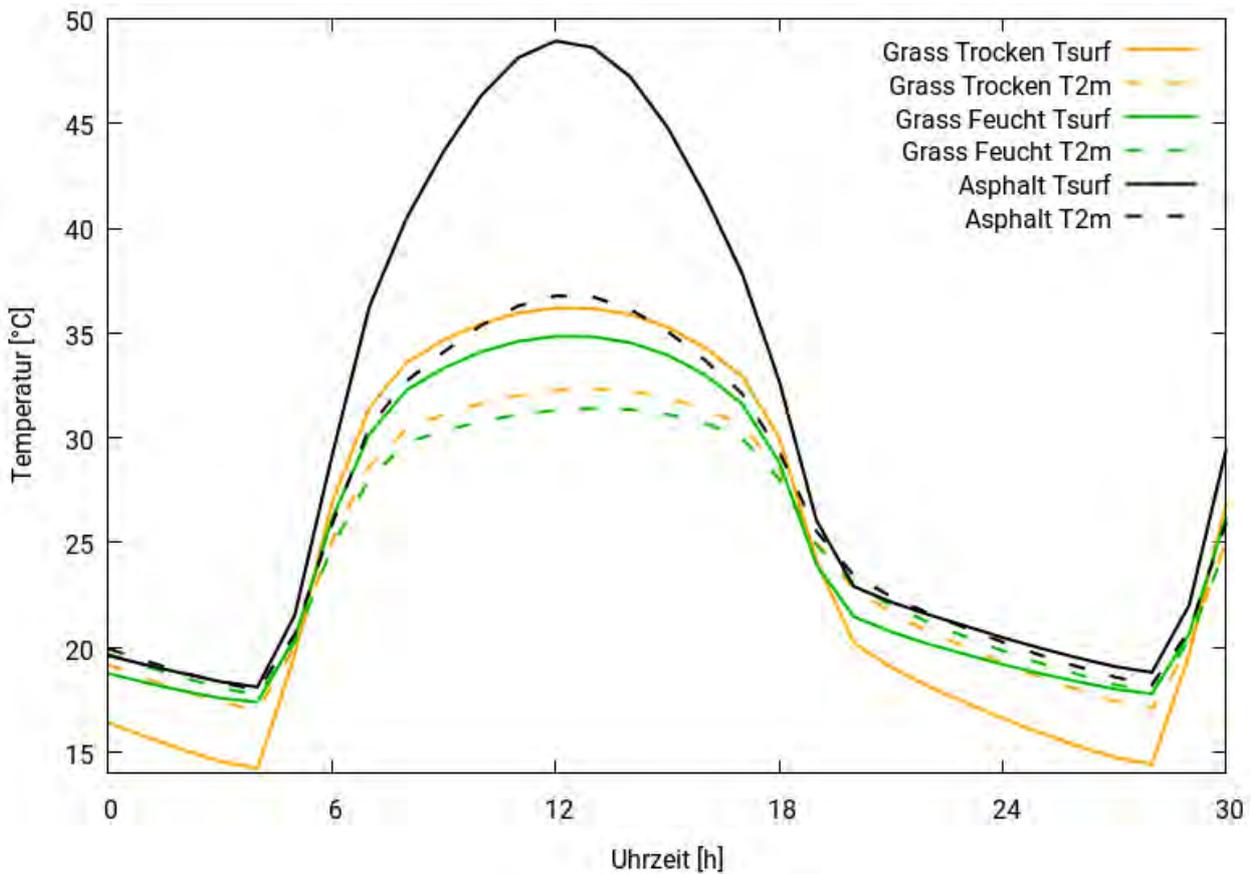


Abbildung 25: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur ('Tsurf') sowie der bodennahen Lufttemperatur ('T2m') von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

4.1.1 SZENARIEN-ENTWICKLUNG

Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die sogenannte Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEO-NET entwickeltes, ebenenunabhängiges Methodenpaket zur szenarienbasierten Untersuchung der Zukunftsperspektive in modellgestützten stadt- und regionalklimatischen Analysen. Der Einsatzbereich ist die Unterstützung formeller und informeller raumkonkreter Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Klimafolgenanpassung in den Handlungsfeldern urbane Hitzevorsorge und urbaner Kaltlufthaushalt auf Landes- und Regionalebene sowie bei gesamt- und teilstädtischer Betrachtung.

Im Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt- bzw. regionalklimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte oder eines Masterplans Stadtklimawandel erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

Neben eigenentwickelten – und ggf. projektindividuellen – Analyse- und Auswerteroutinen werden im Rahmen der Delta-Methode in der Planungspraxis/-theorie bzw. der Umweltmeteorologie bereits etablierte Methoden eingesetzt. Hierzu gehören diskursorientierte Ansätze wie die Szenariotechnik (vgl. Fürst und Scholles 2008) ebenso wie mathematisch-statistische Bewertungsverfahren (z.B. die Z-Transformation), die in verschiedenen umweltmeteorologischen Richtlinien beschrieben sind (z.B. VDI 2008, VDI 2015).

Gegenwärtig können mithilfe des Methodenpakets folgende, für die urbane Hitzevorsorge zentrale Themenkomplexe ebenen-/maßstabsunabhängig modelltechnisch abgebildet werden:



- Modul 1: Auswirkungen des Klimawandels (allmähliche Temperaturzunahme sowie reduzierte Bodenfeuchten aufgrund zunehmender Trockenheit)
- Modul 2: Auswirkungen von Flächennutzungsänderungen (Stadtentwicklung, Stadtsanierung, Verkehrs-/Grünflächenplanung, Waldumbau)
- Modul 3: Auswirkungen von gebäude- und boden-/flächenbezogenen Anpassungsmaßnahmen

Die Module können je nach spezifischer Fragestellung und zur Verfügung stehender Grundlagen für die Modellierungen individuell zusammengestellt werden. Die konkrete Ausgestaltung im vorliegenden Projekt ist im Folgenden beschrieben.

In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sogenannten Wirkmodellen – hat sich die Fokussierung auf die Analyse von Extremszenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren Zukünfte betrachtet, sondern eine Auswahl vorgenommen. Es werden die Szenarien gewählt, die den Analysezielen entsprechend Aussagen liefern. Dies sind oftmals besonders herausfordernde oder eine große Bandbreite aufweisende Szenarien, um mögliche Entwicklungspfade aufzuzeigen.

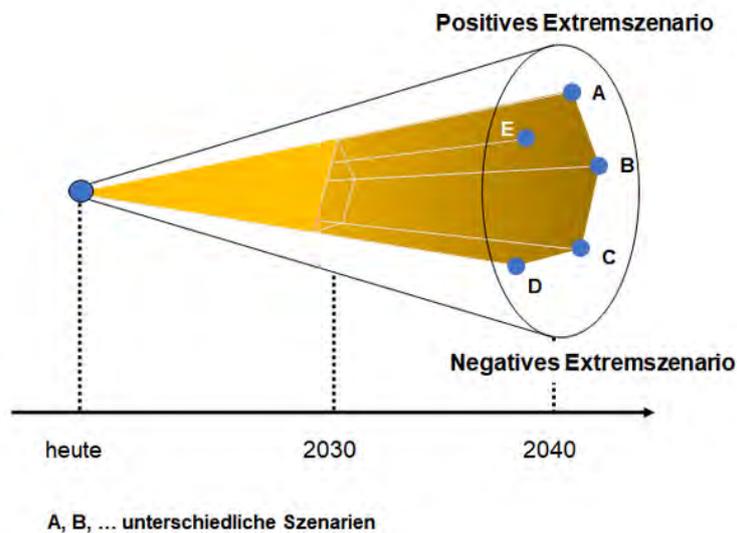


Abbildung 26: Der Szenario-Trichter (Quelle: Business Wissen 2023)

Im vorliegenden Fall wurden zwei Zukunftsszenarien festgelegt. Zielhorizont ist die Periode 2031 – 2060, mit Fokusjahr 2045. Das Szenario „schwacher Klimawandel“ basiert auf dem 25. Perzentil des RCP-Szenarios 4.5, während das Szenario „starker Klimawandel“ auf Basis des 75. Perzentils des RCP-Szenarios 4.5 erstellt wurde. Die Temperaturdifferenz für die Sommerperiode, zum Referenzzeitraum 1971 – 2000 wurde auf die Antriebstemperatur der Modellläufe mit FITNAH-3D eingegeben (+0,7 K bzw. +2,7 K).

Die Bodenfeuchte wurde in allen drei Szenarien konstant gehalten (60 % nutzbare Feldkapazität).

Für die beiden Zukunftsszenarien wurden städtebauliche Entwicklungsflächen in die Modelleingangsdaten übernommen (vgl. Kapitel 4.2).

Es wurden keine Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation modelliert. Ansatz ist hier, einzig die Auswirkungen des Klimawandels und der städtebaulichen Entwicklung (letztere begrenzt auf die städtebaulichen Entwicklungsflächen) auf die zukünftige bioklimatische Situation zu untersuchen, um entsprechend Maßnahmen zu empfehlen. Die Entwicklung von Vegetation, besonders von Bäumen in der Stadt (Ausfall durch Hitzestress / Schädlinge / Unwetter einerseits, jährliches Wachstum andererseits) kann aus informationstechnischen Gründen bisher nicht abgebildet werden. Tabelle 6 fasst die wichtigsten Merkmale der Szenarien und der Referenzsituation zusammen.



Tabelle 4: entwickelte Szenarien und ihre zentralen Merkmale

Szenario	Zentrale Merkmale
Status Quo, „Ist“	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modellierung mit aktueller FITNAH-3D Modellversion unter Verwendung einer Datenbasis von 2019 – 2023 (vgl. Tabelle 7)
Szenario 1 „Schwacher Klimawandel“ 2045	<ul style="list-style-type: none"> ■ Berücksichtigung eines relativ schwachen Temperaturänderungssignals von 0,7 K im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 (RCP 4.5, 25. Perzentil) ■ Städtebauliche Entwicklungsflächen (vgl. Kapitel 4.2)
Szenario 2 „Starker Klimawandel“ 2045	<ul style="list-style-type: none"> ■ Berücksichtigung eines starken Temperaturänderungssignals von 2,7 K im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 (RCP 4.5, 75. Perzentil) ■ Städtebauliche Entwicklungsflächen (vgl. Kapitel 4.2)

4.2 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Nach Abschluss der Szenarien- und Methodenentwicklung erfolgte die eigentliche Aufbereitung der Eingangsdaten für die Modellläufe. Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus in unterschiedlichen Auflösungen und Datenformaten vorliegenden Geoinformationen gerasterte Modelleingangsdaten mit einem regelmäßigen Gitter mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen. Das Modell benötigt flächendeckende Informationen zu folgenden Parametern:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe (Bäume und Baustruktur)

Das Modellgebiet ist dabei für alle durchgeführten Modellläufe identisch. Es beinhaltet das gesamte Gebiet von Pro-Sud sowie das angrenzende Umland. Die Abgrenzung erfolgte nach gutachterlich eingeschätzten Kaltluftfeinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers und hat eine Größe von ca. 780 km² (Abbildung 27). Da die sich hieraus resultierende Anzahl an Pixel die Kapazität der FITNAH-3D-Modellierung übersteigt, wurde das Untersuchungsgebiet in 4 Kacheln unterteilt, die einzeln modelliert werden. Jede Kachel misst ca. 18 km x 15 km und resultiert in 10.806.601 Rasterzellen, wobei für jede Rasterzelle jeweils eine Information zur Geländehöhe, Landnutzung und Strukturhöhe hinterlegt ist. Zur Vermeidung von Randeffekten überlappen sich die Kacheln sowohl in der Horizontalen als auch in der Vertikalen um mindestens 25 % (ca. 4,8 km).

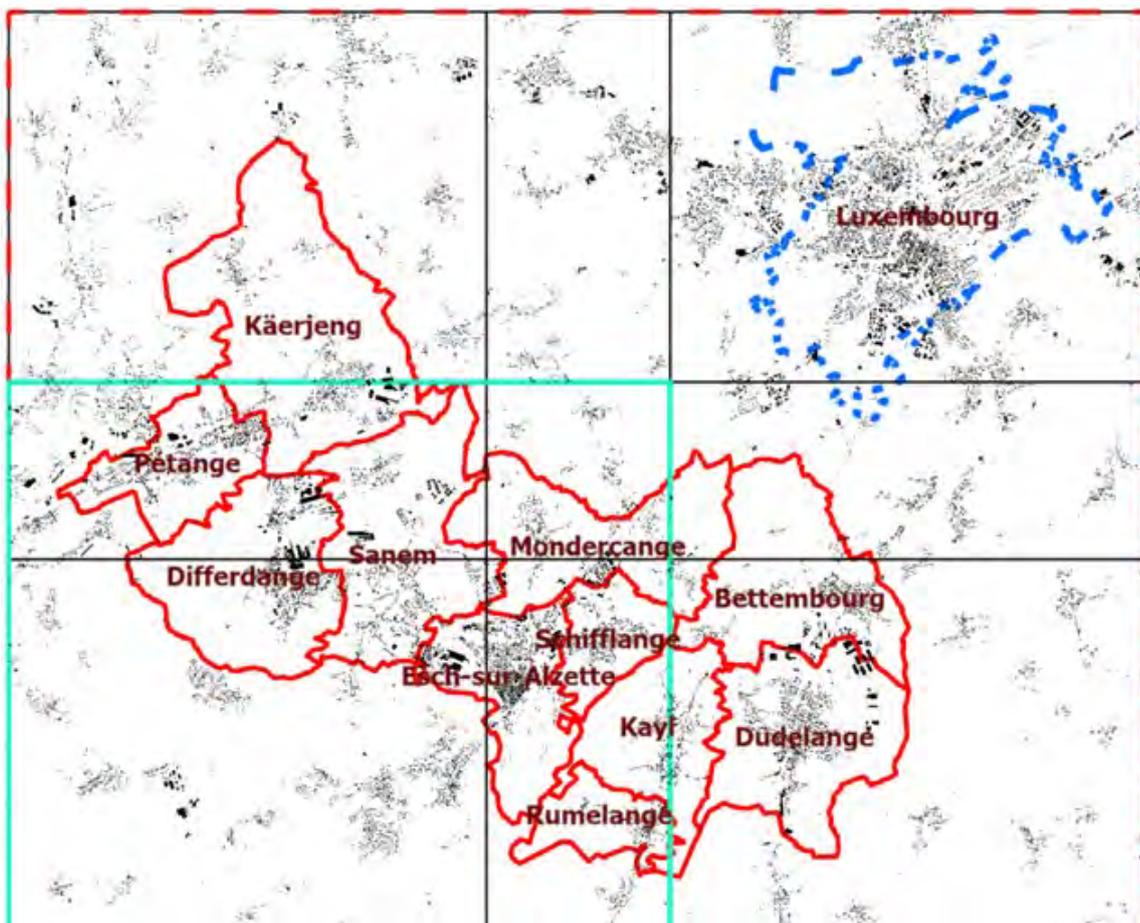


Abbildung 27: Modellgebiet unterteilt in vier sich überlappenden Kacheln (Kachel 1 ist hervorgehoben)



Im Folgenden werden die verwendeten Datensätze erläutert und dabei auf Gemeinsamkeiten und Unterschieden zwischen der Referenzsituation und den Eingangsdaten der Zukunftsszenarien eingegangen. Tabelle 7 zeigt die wichtigsten Datenquellen für die Eingangsdaten. Die Primärdaten liegen in einer hohen räumlichen Auflösung bzw. Genauigkeit / Lagetreue für ganz Luxemburg vor, sodass es bei der Übertragung ins Modellraster trotz der für gesamtstädtischen Modellanwendungen sehr hohen Auflösung des Modells zu Generalisierungseffekten kommt.

Tabelle 5: Datenquellen zur Erstellung der Eingangsdaten

	Aktualität	Datentyp	Auflösung
Geländemodell	2019	Raster	0,5 m
Oberflächenmodell	2019	Raster	0,5 m
Gebäude/-höhen	2023	Flächenvektoren	-
	2022	Multipatch	LOD 1
Landcover	2021	Raster	0,2 m
Wasser	2019	Flächenvektor	-
Tree-footprints	2019	Flächenvektor	

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Untersuchungsgebietes immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Situation wird demnach aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens 2019 aufweisen. Aufgrund der Notwendigkeit der Kombination von verschiedenen Geodaten ist es jedoch nicht möglich, ein feststehendes Jahr als „Ist-Zustand“ anzunehmen. Die meisten Datengrundlagen stammen jedoch mindestens aus dem Jahr 2019 und waren zum Zeitpunkt der Eingangsdatenaufbereitung (2022) demnach sehr aktuell. Alle Eingangsdaten wurden zudem hinsichtlich ihrer Plausibilität mittels Orthophotos abgeglichen und auch vom Auftraggeber gegengeprüft. Außerhalb von Luxemburg wurde dabei auf frei verfügbare Daten zurückgegriffen. Für angrenzende Gebiete aus Frankreich wurden Geodaten über Géoservices IGN bezogen (<https://geoservices.ign.fr/>), für Belgien wurden hauptsächlich Open-Street-Map-Daten verwendet. Im Umland sind die Eingangsdaten weniger detailgetreu aufbereitet, aber grundsätzlich ausreichend, um das Prozessgeschehen zwischen dem den Pro-Sud-Gebiet und seinen Nachbarorten hinreichend genau zu erfassen.

Die Geländehöhe des Modellgebiets wird in einem digitalen Geländemodell (DGM) dargestellt, welches von einer ursprünglichen 0,5 m-Auflösung in die für die Modellierung notwendige 5 m-Rasterauflösung gemittelt wurde (Abbildung 28). Im Gebiet Pro-Sud treten Höhenunterschiede von 185 Metern auf. Die niedrigsten Täler mit Höhen im Bereich von etwa 249-270 m ü. NHN befinden sich im Nord-Westen zwischen Pétange und Käerjeng, im Zentrum von Bettembourg und an der süd-östlichen Grenze von Dudelange zu Frankreich. Die am höchsten gelegenen Bereiche befinden sich im Naturreservat Haard-Hesselberg-Staebierg, welches sich südlich durch die Gemeinden Esch-sur-Alzette, Dudelange, Kayl und Rumelange zieht, und die süd-westlichen Wald- und Freiflächen in Differdange.

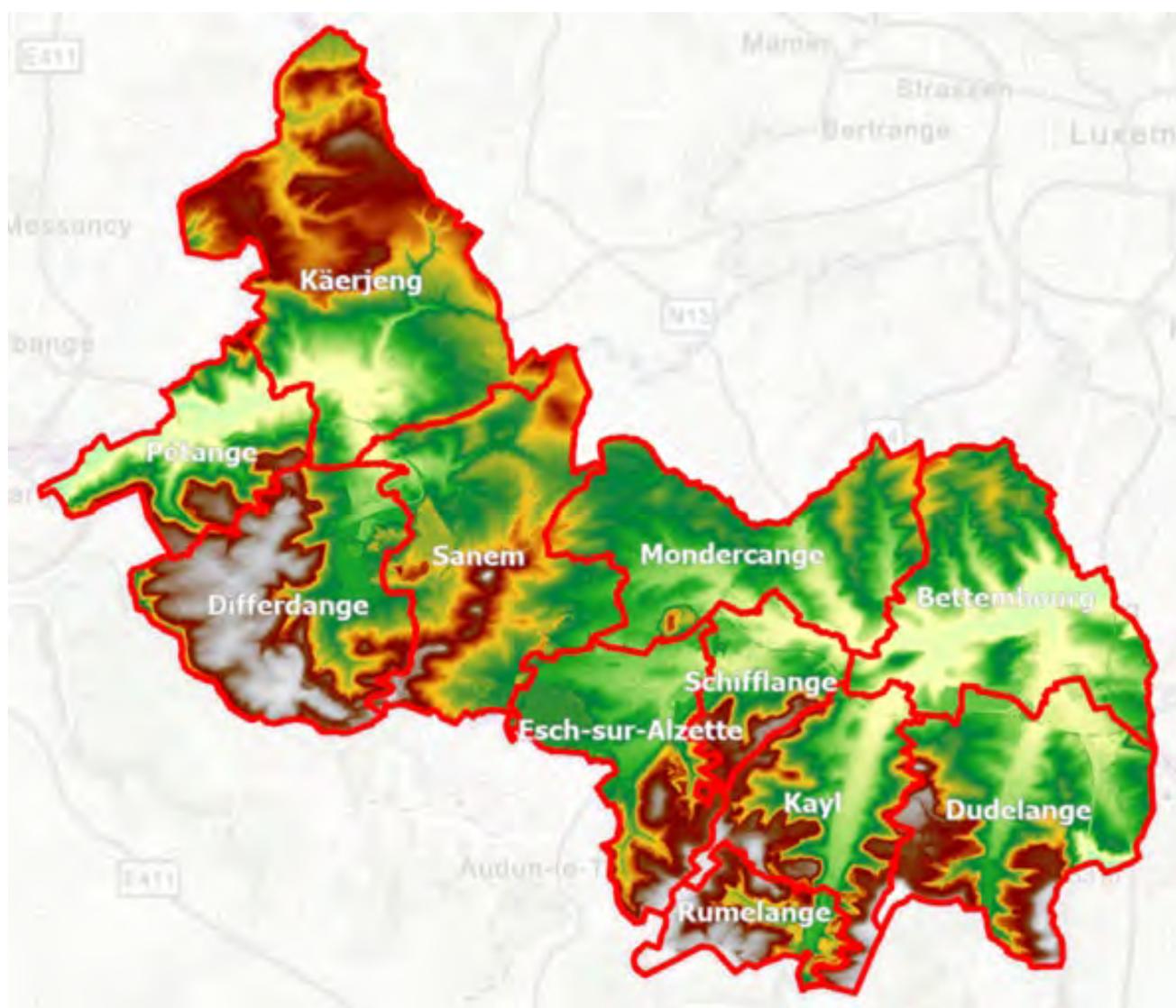


Abbildung 28: Geländehöhen in der Region PRO-SUD

Die Landnutzung im Pro-Sud Gebiet wird über 10 verschiedene Nutzungsklassen definiert, welche jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen (Abbildung 29). Diese wurden über die in Tabelle 7 aufgeführten Geodaten klassifiziert. Bei der vorliegenden Rasterzellenbreite von 5 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungs-klassifizierung aufzulösen. Bei den Bäumen bzw. hoher Vegetation über 3 m werden drei verschiedene Untergründe unterschieden. So werden Bäume über Versiegelung (z.B. Straßenbäume), Bäume über Rasen (z.B. Bäume in Parks) und Bäume über naturfernem Boden unterschieden. Baumstandorte und Baumhöhen im Pro-Sud Gebiet wurden über das landcover-Raster (Klasse „Baum“) in Kombination mit dem Oberflächenmodell und dem Tree-footprints-Datensatz ermittelt. Für Gebäude und Bäume werden die relativen Höhen über dem Gelände im Strukturhöhenraster dargestellt, um die dreidimensionale Wirkung im Modell zu erzielen.

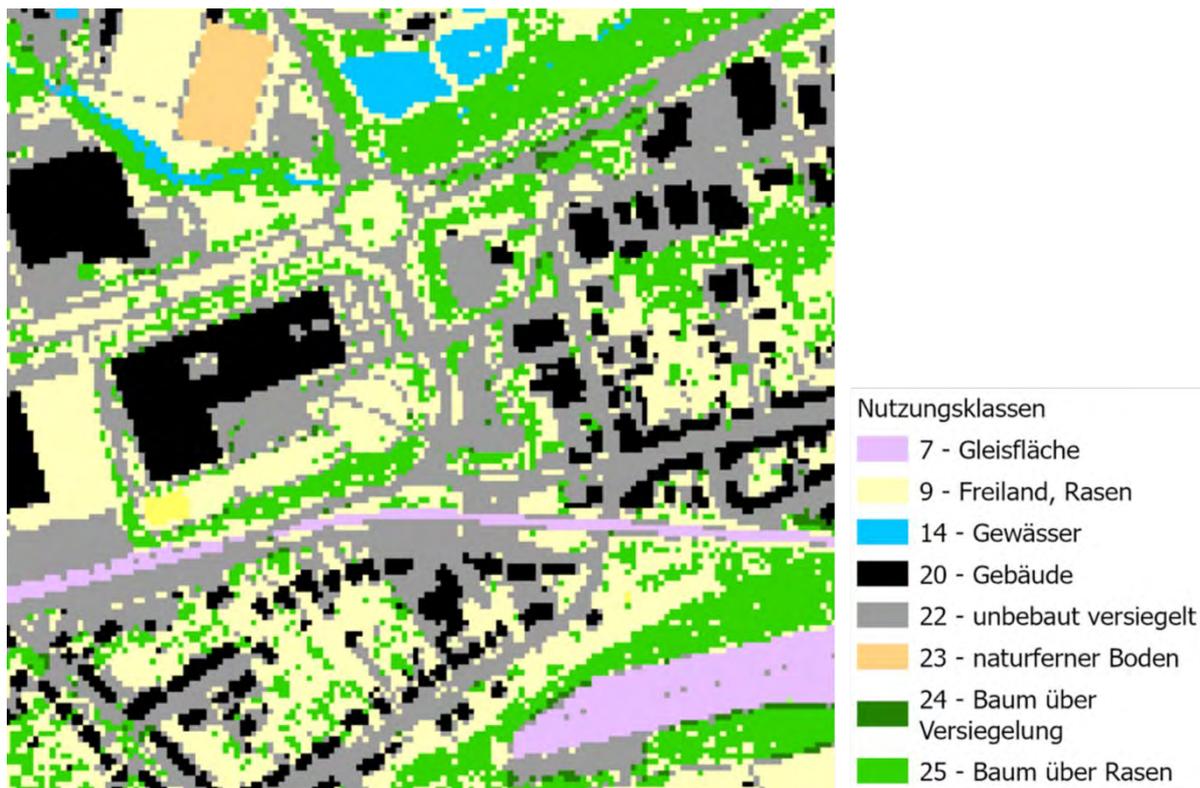


Abbildung 29: Ausschnitt des Nutzungsrastrers im 5 m Raster.

Neben einer individuellen bodennahen Lufttemperatur ist FITNAH-3D auch in der Lage, räumlich und tageszeitlich flexible Oberflächentemperaturen von offenen Wasserflächen zu berücksichtigen. Für die Ableitung der Wassertemperaturen standen Messdaten vom „Ministère de l'Environnement, du Climat - Administration de la gestion de l'eau“ für den Fluss Alzette zur Verfügung. Es wurde eine mittlere sommerliche Wassertemperatur von 18,34 °C ermittelt. Für die übrigen größtenteils stehenden Gewässer wurde eine Standard-Wassertemperatur von 20 °C vergeben.

Bei den beiden Zukunftsszenarien wurde neben der klimatischen Änderung auch der Einfluss der Siedlungsentwicklung untersucht. Hierfür mussten die Eingangsdaten angepasst werden. Der Landnutzung für die Zukunftssituation liegt an erster Stelle diejenige der Referenzsituation zugrunde. Siedlungsentwicklungsflächen wurden zum einen direkt von den Gemeinden zur Verfügung gestellt. Weiterhin konnten zahlreiche Planunterlagen in Form von PAGs (= plan d'aménagement général) über die Plattform für offene Geodaten in Luxemburg bezogen werden (<https://data.public.lu/fr/pages/topics/geospatial/>). Aus diesen Unterlagen wurden nur die bereits genehmigten Teilbebauungspläne PAPs (= plans d'aménagement particuliers) verwendet. Darüber hinaus hat das Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) sogenannte RaumPlus-Potential-Flächen übermittelt. Hierbei handelt es sich um Siedlungsentwicklungsflächen, die für den gesamten Bereich Pro-Sud gelten und für welche zum größten Teil noch keine konkreten Planunterlagen vorliegen. Über die Attribute wurde zwischen dem Potentialtyp einer Fläche (Außenreserve, Baulücke oder Innenentwicklungspotential) und der zukünftigen Flächennutzung unterschieden. Für ca. 18 % der Flächen waren zudem noch Werte zur GRZ, GFZ und Versiegelungsgrad eingetragen.



Wenn für Siedlungsentwicklungsflächen keine weitergehenden Konzeptionen oder städtebaulichen Entwürfe existieren, wird für die Einarbeitung der Flächen in die Eingangsdaten der sogenannte Mischpixelansatz verwendet. Dazu muss für jede Fläche ein prozentualer Anteil an Fitnah-Nutzungsklassen definiert werden. Bei Flächen mit Angaben zu GRZ und Versiegelungsgrad (VSG), wurden die Anteile wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} \text{Grünfläche} &= (1 - \text{VSG}) * 0,8 \rightarrow 80 \% \text{ der Freifläche} \\ \text{Baum} &= (1 - \text{VSG}) * 0,2 \rightarrow 20 \% \text{ der Freifläche} \\ \text{Gebäude} &= 0,6 * \text{GRZ} \rightarrow 60 \% \text{ der überbaubaren Fläche} \\ \text{Versiegelte Fläche} &= \text{Rest} \rightarrow \text{übrige versiegelte Fläche bestehend aus } 40 \% \text{ der} \\ &\quad \text{überbaubaren Fläche + Erschließungsflächen aus VSG} \end{aligned}$$

Für die Flächen ohne Angaben zu GRZ und VSG wurden Standardwerte definiert. Diese und die daraus resultierenden Nutzungsklassenanteile wurden mit dem LIST abgesprochen und sind in **Tabelle 8** eingetragen. Eine individuelle Gebäudehöhe wurde ebenfalls für jede Flächennutzungsart definiert. Im Zukunftsmodelllauf füllt das FITNAH-Modul „Randomisator“ die ausgewiesenen Raum-Plus-Flächen rasterpixelweise und zufällig mit dem Anteil einer verknüpften Lookup-Tabelle auf, die für jede Fläche die Anteile der Nutzungsklassen zeigt. Durch diese Approximation gelingt es, zukünftige Änderungen von Temperaturfeldern und Kaltluftprozessen näherungsweise vorherzusagen, ohne einer konkreten Flächenplanung vorzugreifen.

Tabelle 6: Standardwerte für GRZ und VSG für verschiedene Flächennutzungen und die daraus berechneten Anteile für Nutzungsklassen + Gebäudehöhe

Flächennutzung	GRZ	VSG	Nutzungsklassenanteil in Prozent [%]				Strukturhöhe in Meter [m]
			Gebäude	versiegelt	Grünfläche	Bäume	Gebäudehöhe
1 - Industrie und Gewerbe	0,8	0,8	48	32	16	4	14
2 - Sondergebiet	0,8	0,8	48	32	16	4	14
3 - Mischgebiet urban	0,6	0,8	36	44	16	4	10
4 - Mischgebiet Dorfkern	0,6	0,8	36	44	16	4	10
5 - Mischgebiet ländlich	0,6	0,65	36	29	28	7	10
6 - Öffentlicher Bereich	0,6	0,65	36	29	28	7	10
7 - Wohngebiet	0,4	0,4	24	16	48	12	8
8 - Sport- und Erholungsfläche	0,3	0,3	18	12	56	14	8
9 - Kleingartenzone	0,2	0,2	12	8	64	16	6

Die Planunterlagen der Gemeinden und die PAPs waren detailliert genug, um sie direkt in das Nutzungsraster einarbeiten zu können, da geplante Gebäude, Grünflächen und Straßen/Wege bereits eingezeichnet waren. Nur Vegetation auf privaten Grundstücken musste bei einigen Flächen nachgetragen werden. Hierzu wurde auf den prozentualen Anteil der Bäume der Raum-Plus-Flächen zurückgegriffen, der in der entsprechenden Flächennutzungsart ermittelt wurde. Wenn bei einem Plangebiet keine Vegetation eingezeichnet war, wurden zufällig Bäume verteilt, bis der prozentuale Anteil erreicht war. Abbildung 30 zeigt, wie sich die Anwendung des Randomisators auf das Zukunfts-Nutzungsraster auswirkt. Durch die Einarbeitung der Zukunftsflächen verringert sich der Anteil an Freifläche und Bäume über Freiflächen im Pro-Sud-Gebiet um 2 %. Die Klasse „Gebäude“ hat einen Zuwachs von 1,5 % und Klasse „unbebaut versiegelt“ einen Zuwachs von 0,4 % (vgl. Abbildung 31).



Abbildung 30: Einarbeitung der Siedlungsentwicklungsflächen mit Planunterlagen und Raum-Plus-Flächen. Links = Ist-Nutzungsraster, Rechts = Zukunfts-Nutzungsraster.



Anteile der Nutzungsklassen für das Ist- und Zukunftsnutzungsrastr im Pro-Sud-Gebiet

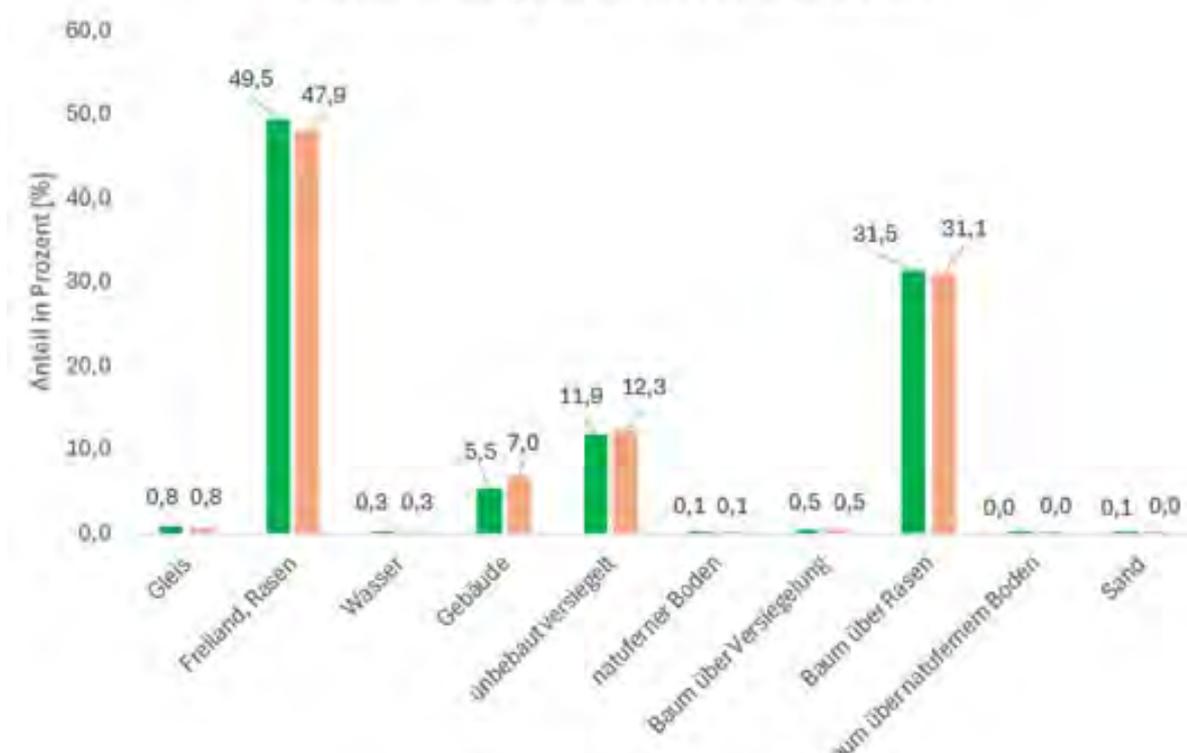


Abbildung 31: Anteile der Nutzungsklassen im Ist- und Zukunftsnutzungsrastr. Einige Klassen zeigen aufgrund ihrer seltenen Verwendung einen Anteil von 0,0 %. Dies ist begründet durch Rundungseffekte.

4.2.1 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend, ein sogenannter autochthoner Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen, großräumig (allochthon) bedingten Luftaustauschs zu Situationen, die im Jahresverlauf in Teilbereichen der Stadt die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis 14:00 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes (21. Juni). Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in der Region Pro Sud und Umgebung besonders gut ausprägen. Charakteristisch für solch eine sommerliche (Hochdruck-) Wetterlage sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen Prozesse rund um den Wärmeinseleffekt und die Kaltluftdynamik.

In Abbildung 32 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage typischen tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

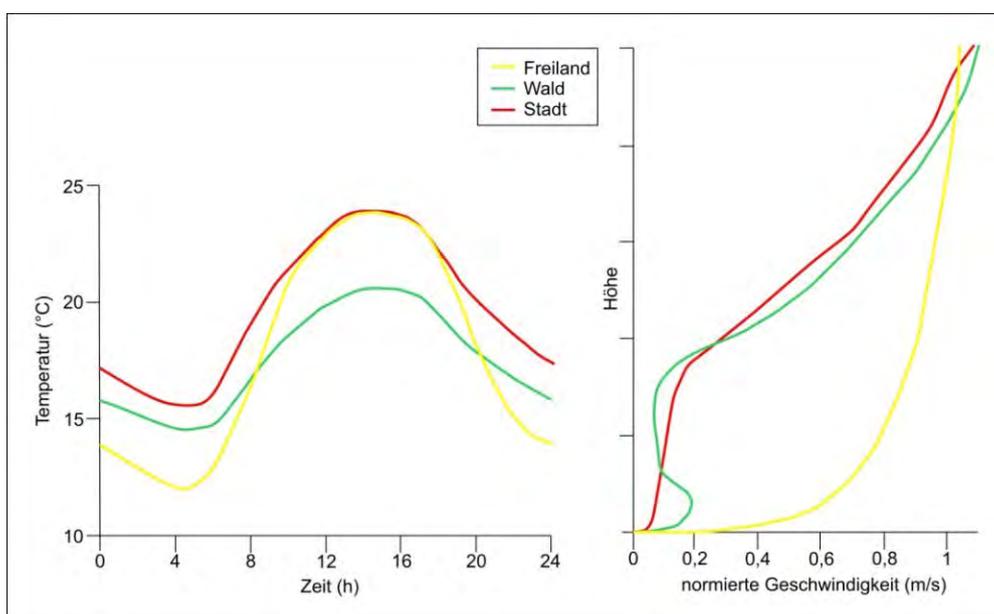


Abbildung 32: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)



Die Berücksichtigung der in Kapitel 3.3 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgt über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Aufprägung des Temperatursignals für die beiden Modellrechnungen wird auf Basis des in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatzes vorgenommen (Schär et al. 1996). Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhenniveaus addiert. Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab. Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden 21,0 °C in der Ist-Situation bzw. 21,7 °C (Szenario „schwacher Klimawandel“) sowie 23,7 °C (Szenario „starker Klimawandel“).

Als Antrieb für FITNAH-3D diene in der vorliegenden Untersuchung die Modellierung der bereits vorliegenden regionalen Klimaanalyse für das Land Luxemburg, welches 2021 in deutlich größerer Auflösung (25 m * 25 m) erstellt wurde (GEO-NET, 2021).

Die gewählten Startbedingungen repräsentieren eine zumindest für Teile der Stadt thermisch belastende Situation, nicht aber ein Extremereignis. Dieses Vorgehen wird gewählt, weil sich solche Lastfälle durch eine nachhaltige Stadtentwicklung und entsprechende Maßnahmen im Außenraum noch positiv beeinflussen lassen. Extremereignisse hingegen sind zu selten und zu intensiv, um alleine auf Basis der in klassischen Stadtklimaanalysen im Allgemeinen und dieser Untersuchung im Speziellen betrachteten Maßnahmensets entschärft werden zu können.

4.2.2 MODELLAUSGABEGRÖSSEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf für noch kürzere – Zeitschnitte aus (Tabelle 9). Insgesamt ergibt sich somit eine deutlich vierstellige Anzahl an Variablendimensionen als Ausgangspunkt für die aufgabenstellungsorientierte Weiterverarbeitung dieses Datensatzes mit einem Umfang von mehreren hundert Gigabyte. Zu den wesentlichsten Parametern zählen Strömungsparameter (U/V/W-Komponenten des Windes) sowie die die bodennahe Lufttemperatur beeinflussende Größen wie der fühlbare und latente Wärmestrom.

Tabelle 7: Von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter.

Parameter und Einheit	Einheit	Dimensionalität
U-Komponente des Windes	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
V-Komponente des Windes	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
W-Komponente des Windes [m/s]	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Potenzielle Lufttemperatur	[K]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Diffusionskoeffizient momentum	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Turbulente kinetische Energie	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Wärmestrom der Oberflächen	[W/s ²]	Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen
Luftdruck	[N/m ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Spezifische Feuchte	[kg/kg]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten



Um die der Analyse zugrunde liegenden Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sogenannten post-processing Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und von Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus sechs abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 10).

In der Maximalvariante – die vor allem im Zusammenhang mit umfassenden Stadtklimaanalysen zum Tragen kommt – handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatischen Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte existiert hier eine Ausnahme, bei der bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesgangs als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung.

Tabelle 8: abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt

Parameter und Einheit	Einheit	Höheniveau	Zeitliche Dimension
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Windrichtung [als geographische Rotation]	°	2 m ü.Gr.	04:00 Uhr
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Kaltluftproduktionsrate	m ³ /m ² h	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Kaltluftvolumenstromdichte	m ³ /(s* m)	Integral bis 50 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Physiologisch Äquivalente Temperatur	[°C]	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr

4.2.3 QUALITÄTSSICHERUNG

Die Qualitätssicherung stellt den abschließenden Arbeitsschritt der Modellierung im engeren Sinne dar. Sie ist Bestandteil des zertifizierten Qualitätsmanagements nach DIN EN ISO 9001:2015, das bei GEO-NET für komplexere Modellanwendungen vorgesehen ist. In diesem Arbeitsschritt unterzieht das bearbeitende Projektteam die Modellergebnisse einem teilformalisierten Plausibilitäts-Check. Hierbei werden die Modellergebnisse zum einen anhand von ausgewählten Teilgebieten im Rahmen einer Teamsitzung fachlich diskutiert sowie ggf. geostatistischen ad hoc Analysen unterzogen bzw. mit vergleichbaren Ergebnissen aus anderen Projekten in Beziehung gesetzt. Die Teilgebiete sind so gewählt, dass sie alle im Rahmen vorheriger Arbeitsschritte identi-

fizierten Besonderheiten sowie alle Abweichungen vom bisherigen Modellstandard abdecken. Die Modellergebnisse gelten dann als qualitätsgesichert, wenn das Projektteam durch einstimmiges Votum deren hinreichende Qualität erklärt. Werden signifikante Auffälligkeiten festgestellt, sind diese in einem ggf. iterativen Prozess kostenneutral für den Auftraggeber zu bereinigen.

Im vorliegenden Fall erfolgte die Qualitätssicherung getrennt nach den drei Modellläufen, wobei in den Szenarien insbesondere auch die angenommene Änderung durch dem Klimawandel in den Fokus genommen wurde. Alle Modellläufe durchliefen erfolgreich die Qualitätssicherung.

4.2.4 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Die numerische Stadtklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätzen der Fachdisziplin (Messungen, klimatopbasierte GIS-Analysen) aufgrund ihres physikalischen, flächendeckenden und das Kaltluftprozessgeschehen berücksichtigenden Outputs überlegen. Dennoch sind Modellanwendungen mit Unsicherheiten verbunden, auf die im Sinne eines umfassenden, auf Transparenz und Akzeptanz ausgerichteten Analyseansatzes hingewiesen werden muss. Die Unsicherheiten lassen sich unter den folgenden Überschriften einordnen:

- Unsicherheiten im Modell („interne Unsicherheiten“)
- Unsicherheiten in den Eingangsdaten („externe Unsicherheiten“)

Zunächst einmal sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit (Stachowiak 1973). Sie erheben damit keinen Anspruch, das zu modellierende System allumfassend abzubilden, sondern wollen dieses hinreichend gut repräsentieren. Den Maßstab zur Gütebeurteilung bildet dabei das anvisierte Einsatzgebiet des Modells. Dieser Ansatz gilt für (Stadt-)Klimamodelle aufgrund der Komplexität der in physikalischen Gleichungen abzubildenden (Stadt-)Atmosphäre in besonderem Maße. Folglich ist das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern jene Prozesse, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. FITNAH-3D erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl. 7 (VDI 2015) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten ist, aus denen sich jedoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sogenannten RANS-Modus (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E-Vorhaben ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sogenannte „Modellrauschen“. Es beschreibt, in welchem Ausmaß die Ergebnisse zwischen mehreren Modellläufen mit demselben Antrieb bzw. denselben Randbedingungen über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen variieren. Dieser Punkt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarien-Rechnungen enthält, also z.B. die Auswirkungen des zukünftig erwarteten Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder Maßnahmen-szenarien abbildet. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 bis 0,2 K pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich bei einer Mittelwertbildung auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltluftthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt das Modellrauschen bei +/- 1 bis 2 % bezogen auf eine flächenhafte Betrachtung. Bei der Kaltluftproduktionsrate besteht aufgrund ihres primär empirisch hergeleiteten Wertes keine Unsicherheit. Insgesamt zeigt sich, dass zwar modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der flächenhaft aggregierten Werte in der Basisgeometrie zu vernachlässigen sind.



Insbesondere kleinräumig stellen die zur Verfügung stehenden bzw. mit vertretbarem Aufwand erzeugbaren Modelleingangsdaten die relevantere Unsicherheitsquelle dar. Die Unsicherheiten können sich dabei ergeben aus

- der Art ihrer Weiterverarbeitung zur Verwendbarkeit im Rahmen der Analyse
- der Aktualität der Daten (bzw. ihrer Obsoleszenz), und
- ihrer Genauigkeit (bzw. Ungenauigkeit) bzw. ihres Informationsgehaltes

Im vorliegenden Projekt wurden zunächst sämtliche Eingangsdaten in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 25 m² (5 * 5 Meter) repräsentiert. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von meso-skaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 5 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Straße mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, sodass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. in den grundsätzlichen Schlussfolgerungen keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten.

Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich zum einen auf die Gebäude. Auf Basis der für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Daten sind Gebäude in der vorliegenden Analyse als Klötzchenmodell (LOD 1) abgebildet – also mit ihrer exakten Lage im Raum und ihrer gemittelten Dachhöhe. Damit sind flächendeckend alle Informationen vorhanden, um die Gebäude im Modell als Strömungshindernis definieren zu können. Auch bzgl. ihres Wärmeemissionsgrades können Gebäude hinreichend gut im Modell abgebildet werden. Allerdings bestehen hier Unsicherheiten, die sich aus fehlenden (gesamtstädtischen) Informationen zu z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschließlich über das Bauvolumen abgebildet werden.

Vergleichbares gilt für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Diese könnten aus einer Stadtbodenkartierung abgeleitet und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Da ein städtischer Geodatensatz nicht verfügbar ist, können diese Informationen in einer gesamtstädtischen Analyse nicht mit vertretbarem Aufwand verwendet werden. Folglich wird im Modell mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegende Zusatzinformation „naturferner Boden“ über das Nutzungsraster modifiziert wird.

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall einen Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 K und in den Nachtstunden von 1,1 K betragen kann, was wiederum zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (Groß 2016). Es sei noch einmal betont, dass diese Unsicherheiten nicht im Modell begründet liegen – in dem diese Informationen grundsätzlich verarbeitet werden könnten – sondern in nicht oder nicht flächendeckend zur Verfügung stehenden (Geo-)Basisinformationen. Angesichts der rasanten Entwicklung in der Fernerkundung und der Datenstandards (z.B. im Bereich des BIM - Building Information



Modeling) ist damit zu rechnen, dass entsprechende Informationen mittelfristig (+/- 10 Jahre) für die gesamtstädtische Ebene bereitstehen und modelltechnisch abgebildet werden können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass numerische Modellrechnungen – ebenso wie alle anderen Analysemethoden in der Umweltanalytik im Allgemeinen und der Angewandten Stadtklimatologie im Speziellen – mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind. Es ist aber deutlich geworden, dass diese Unsicherheiten allenfalls kleinräumig relevant sind und folglich auf die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Analyse einen zu vernachlässigenden Einfluss haben dürften. Nichtsdestotrotz wird es die Aufgabe des gesamten Fachgebiets der kommenden Jahre sein, die bestehenden Unsicherheiten weiter zu reduzieren und die Modellergebnisse auf einem sehr hohen Niveau noch weiter zu verbessern.

5. Ergebnisse der numerischen Modellierungen

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für den Status quo und die beiden Klimawandelszenarien (vgl. Kapitel 4.1.1) beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (vgl. Kapitel 4.2.1). Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation. Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Um eine bessere Lesbarkeit des Textes zu ermöglichen, fokussiert sich die Beschreibung der Ergebnisse vorrangig auf die Gemeinde Esch-sur-Alzette. Die Modellergebnisse werden in Form von PDF-Karten sowie als Geodaten (georeferenzierte Raster (*.tif)) an die Auftraggeber übergeben.

5.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD UND KALTLUFTPRODUKTION

Die Ermittlung der bodennahen **nächtlichen Lufttemperatur** ermöglicht es, überwärmte städtische Bereiche (sogenannte städtische Wärmeinseln) zu identifizieren, und die räumliche Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine sommerliche Strahlungswetterlage zu verstehen.

In Abhängigkeit der Landnutzung bzw. Boden- und Oberflächeneigenschaften sowie beeinflusst durch die Lage und Höhe des Standorts, kühlen Flächen in den Abend- und Nachtstunden unterschiedlich stark ab. So reicht die bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Modellergebnis in der Ist-Situation von ca. 13 bis 15 °C über siedlungsfernen Freiflächen bis knapp 20 °C in hoch versiegelten Bereichen und umfasst in Luxemburg Pro-Sud damit eine Spannweite von mehr als 6 °C (Abbildung 33; für die bessere Übersicht ist der Ausschnitt des Zentrums Esch-sur-Alzette gezeigt).

Die höchsten nächtlichen Belastungen um 19 bis 20 °C in der Ist-Situation, und bis zu 22 °C im Szenario „starker Klimawandel“ treten vorwiegend in den dicht bebauten Innenstädten der Gemeinden (bspw. entlang der Rue Zénon Bernard). Aber auch in den hoch versiegelten Gewerbegebieten (bspw. Esch-Schiffflange) auf. Große Parkplatzflächen, sofern weitgehend versiegelt und ohne Beschattung, sind ebenso als nächtliche Wärmeinseln zu erkennen (bspw. Automobilhändler in An der Schmelz) wie einige dicht bebaute Hauptverkehrsstraßen (bspw. Bd John Fitzgerald Kennedy). Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen des Siedlungsraums dagegen sind in den aufgelockerten Wohnsiedlungsbereichen am Stadtrand und in den außenliegenden Ortsteilen zu finden (bspw. entlang Rue Burgronn). Befindet sich ein solch aufgelockerter Wohnsiedlungsbereich zudem in Kaltluftabflussbereichen, können die Temperaturen hier auf die Minimalwerte, die sonst auf großflächigen Freiflächen erwartet werden, sinken (in Esch-sur-Azette weniger anzutreffen, ein Beispiel wäre das Val des Aulunes in Schiffflange). Charakteristisch für viele Wohnquartiere im gesamten Untersuchungsgebiet ist der deutliche Unterschied zwischen den oberflächennahen Lufttemperaturen im dicht bebauten Straßenbereich und in den oftmals großflächigen Grünbereichen hinter den Gebäuden. Hier zeigen sich Temperaturdifferenzen von bis zu 4 °C.

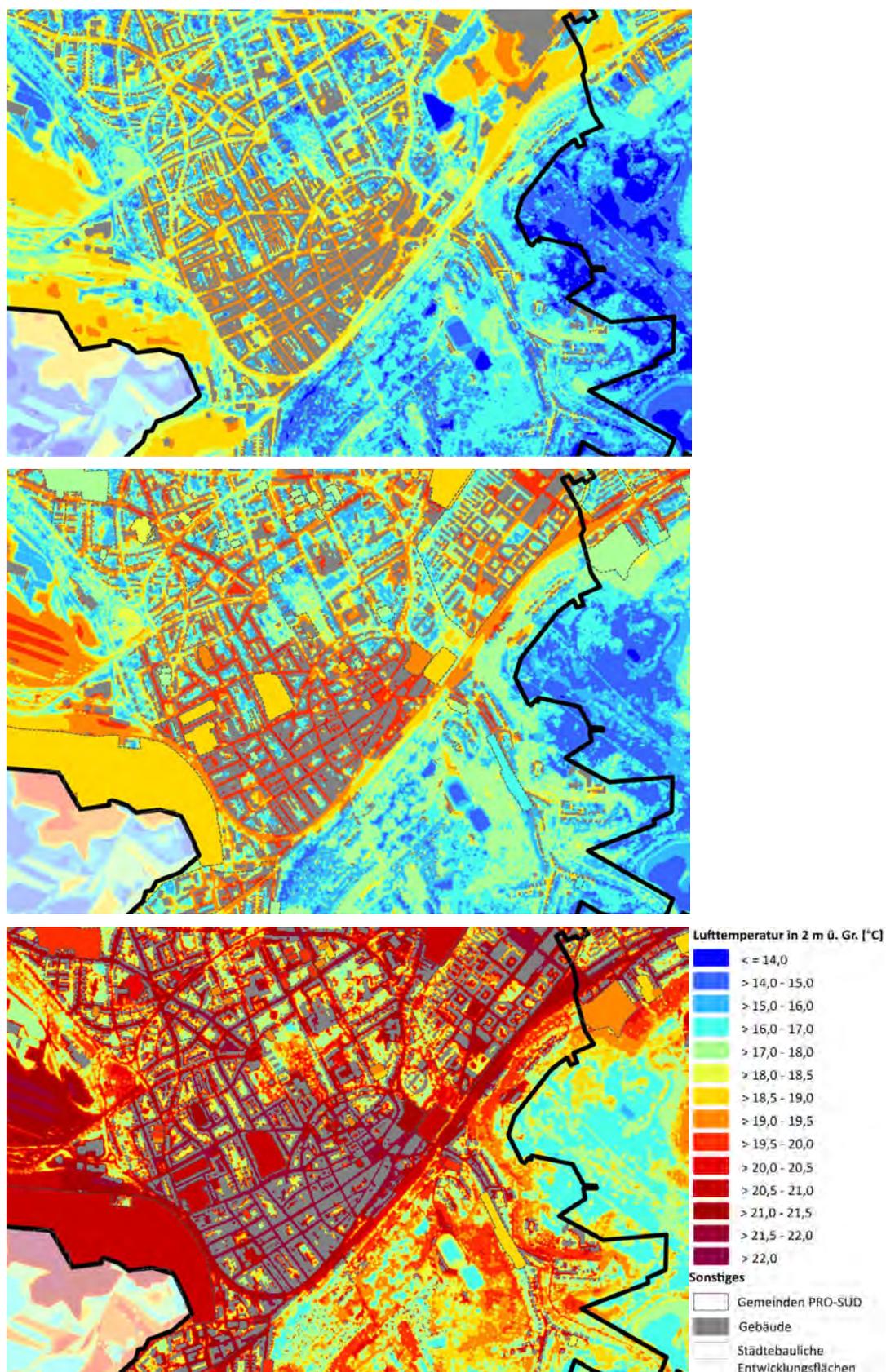


Abbildung 33: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur in einem Ausschnitt von Esch-sur-Alzette. Oben: Ist-Situation, Mitte: Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“, Unten: Zukunftsszenario „starker Klimawandel“.

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich hier ein differenziertes Bild ergibt. Freiflächen im Umland kühlen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 13 - 15 °C (bzw. 15 – 17 °C im Szenario „starker Klimawandel“) auf. In Wäldern bzw. auf Flächen mit dichtem Baumbestand mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und somit die Auskühlung der Oberfläche. Die bodennahen Temperaturen im Naturschutzgebiet Brucherberg-Lalléngerberg liegen bei etwa 15 – 17 °C (bzw. im Szenario „starker Klimawandel“ bis zu 19 °C) in der Nacht. Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrüntem Siedlungsraum zur Folge hat, nehmen größere Waldgebiete bzw. baumbestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Zudem kann sich Kaltluft auch über dem Kronendach bilden.

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über Gewässern und deren unmittelbaren Nahbereich, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen höher als in der Umgebung sein können.

Wie beschrieben, wirkt die Abkühlung der Bodenoberfläche maßgeblich auf das nächtliche Temperaturfeld. Als Maß für die Abkühlung kann die **Kaltluftproduktionsrate** verwendet werden, die anzeigt, wie viel Kaltluft über einer Fläche entsteht. Die Maßeinheit hier ist m^3 pro m^2 pro Stunde. In Abbildung 26 wird die flächenhafte Verteilung der Kaltluftproduktionsrate zum Zeitpunkt 4 Uhr nachts für einen Ausschnitt von Esch-sur-Alzette dargestellt. Über versiegelten Flächen (Straßen und Plätze) findet nahezu keine Kaltluftproduktion statt. Am meisten Kaltluft wird über unversiegelten Freiflächen produziert, vor allem in Kombination mit Hanglagen am rechten Bildrand (vgl. Kapitel 2.2). Innerhalb der Quartiere ist eine Vielzahl an unversiegelten oder gering versiegelten Grünflächen mit lokaler Kaltluftproduktion zu erkennen.



Abbildung 34: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate in einem Ausschnitt von Esch-sur-Alzette, Ist-Situation.

In den Zukunftsszenarien verändert sich zwar das Temperaturfeld, die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Oberflächenstrukturen erfahren aber – bis auf die städtebaulichen Entwicklungsflächen – keine signifikanten Veränderungen. Das Strömungsfeld der Austauschprozesse und die Menge der produzierten und

strömenden Kaltluft unterscheidet sich daher im Vergleich zwischen Ausgangssituation und Zukunftsszenarien im Untersuchungsgebiet nur geringfügig, so dass auf Kartendarstellung an dieser Stelle verzichtet wird.

5.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Der Kaltluftvolumenstrom wird wesentlich durch das Relief bestimmt und zeigt im reliefierten Gelände eine große Variabilität. Die **Kaltluftvolumenstromdichte** wird in Kubikmeter Kaltluft, die pro Sekunde über eine gedachte Linie von einem Meter Breite fließt, angegeben ($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$). Abbildung 35 zeigt die Kaltluftvolumenstromdichte und die bodennahe Strömungsrichtung für den Ausschnitt Esch-sur-Alzette. Die Kernstadt von Esch-sur-Alzette wird nachts vorwiegend – dem Gefälle folgend – aus nordwestlichen und südöstlichen Richtungen angeströmt. Die größten Kaltluftmengen fließen dabei über baumlose (landwirtschaftliche) Freiflächen, mit teilweise über $50 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$. Treffen die Kaltluftmassen auf Siedlungsgebiete, so tragen sie dort effektiv zur Abkühlung bei. Teile der zentralen Stadtbereiche werden zudem durch die thermisch bedingte Ausgleichsströmungen aus den innerstädtischen Grünflächen (bspw. Park Clair-Chêne) mit Kaltluft versorgt. Bebauung und Versiegelung schwächen den Kaltluftstrom ab und im Zentrum der Altstadt beträgt die Kaltluftvolumenstromdichte nur noch weniger als $10 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$.

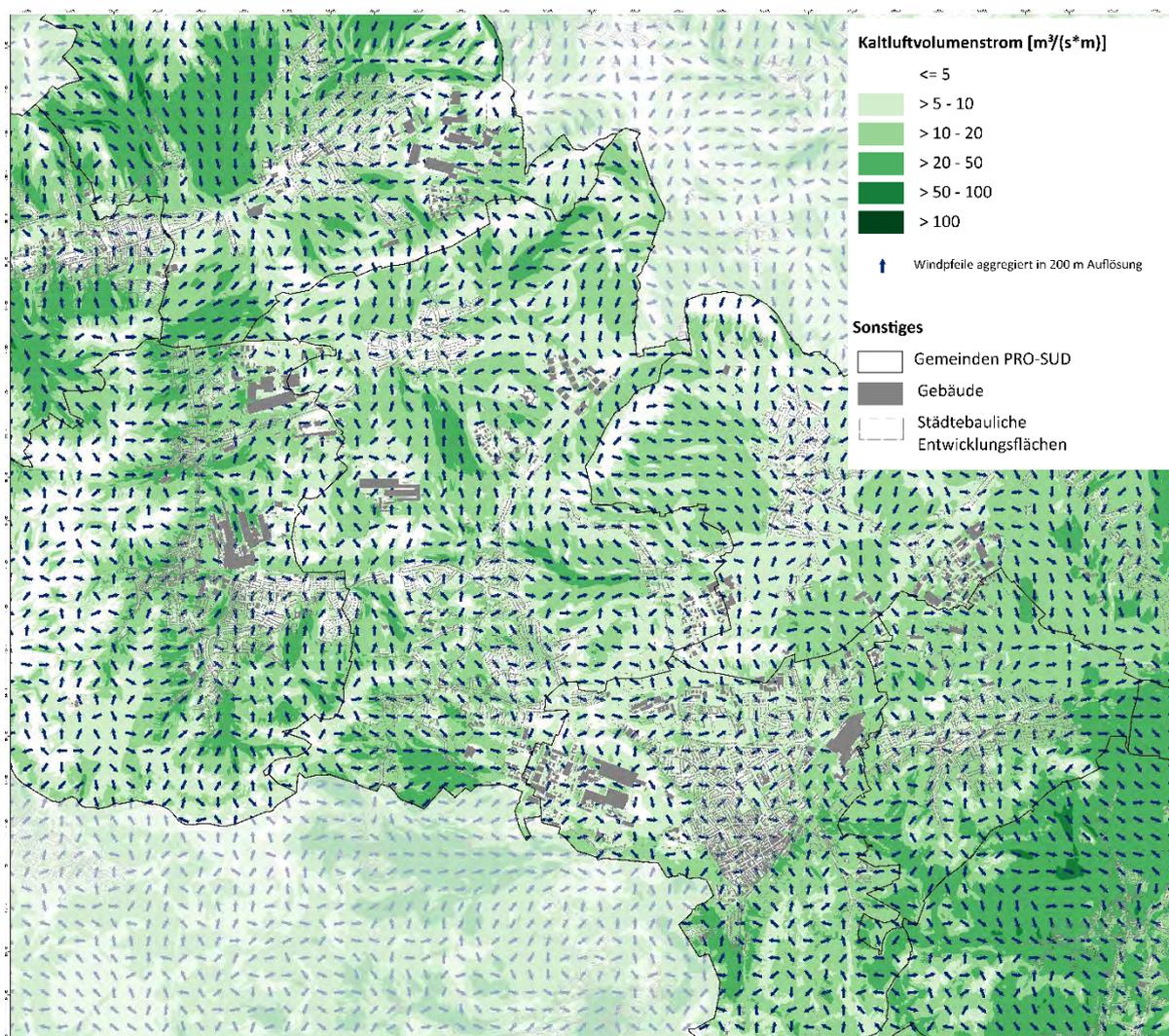


Abbildung 35: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Umfeld von Esch-sur-Alzette, Ist-Situation.

Die für den Siedlungsraum besonders relevanten Kaltluftprozesse werden in der Klimaanalysekarte, u.a. über die Darstellung von Kaltluftleitbahnen hervorgehoben (Kapitel 5.3).

Die geschilderten Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht bis ca. 50 m Höhe auf. Für das bodennahe Kaltluftgeschehen wird der Parameter **Strömungsgeschwindigkeit** herangezogen. In Abbildung 36 ist für einen Ausschnitt von Esch-sur-Alzette die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung der Kaltluftströmung in 2 m über Grund dargestellt. Die Strömungspfeile werden hier in einer Auflösung von 5 m getreu der Auflösung der Modellierung dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, wie die Kaltluft aus dem Park Clair-Chêne mit relativ hoher Geschwindigkeit in Richtung Wohnsiedlungen strömt. Beim Auftreffen auf Gebäude und versiegelte Bereiche vermindert sich der Kaltluftstrom. Baustrukturen sind klare Strömungshindernisse. Breite Straßen und Plätze sowie Parks dagegen können wertvolle Transportlinien für Kaltluft sein, so dient beispielsweise die Rue du Clair-Chêne im weiteren Verlauf dem Kaltlufttransport in östlich anschließende Gebiete.

Die hochauflösende Darstellung in den Modellergebnissen zeigt, dass die bodennahe Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme. So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen (Flurwinde), die auch unabhängig vom Relief auftreten können.

Die bodennahe Kaltluftströmung (Richtung und Geschwindigkeit) bezieht sich auf eine Höhe 2 m über Grund, sodass sie unter Baumbestand sehr gering ausfällt, da die Betrachtungsebene unterhalb des Kronendachs liegt. Auch die Kaltluftvolumenstromdichte (siehe weiter oben) ist im Baumbestand im Vergleich zu Freiflächen reduziert, andererseits ergeben sich gerade in den Hangbereichen Kaltluftabflüsse aus den Wäldern.



Abbildung 36: Ausschnitt aus dem bodennahen nächtlichen Strömungsfeld mit dem Boulevard Price Henri zentral in der Abbildung.

5.3 KLIMAANALYSEKARTEN

Gemäß VDI-Richtlinie 3787, Bl.1 hat die Klimaanalysekarte die Aufgabe, „...die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“ (VDI 2015, 4). Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Aussagen der Analyseergebnisse für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten zu den Themenfeldern Überwärmung, Kaltluftentstehung und Kaltluftfluss.

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt“ (VDI 2015, 13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht, dass die Klimaanalysekarte bewertungstheoretisch der Sachebene angehört. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (Gaede & Härtling 2010, 32). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen. Der „Sprung“ auf die Wertebene erfolgt anschließend über die Bewertungen der Tag- und Nachtsituation und die Planungshinweiskarte (Kapitel 6). Mit diesem Verständnis wurden für Luxemburg Pro Süd folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation
- Klimaanalysekarte für das Szenario „schwacher Klimawandel (2045)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario „starker Klimawandel (2045)“



Abbildung 37: Legende der Klimaanalysekarten.

Die Legende der Klimaanalysekarten gliedert sich jeweils in die Elemente Wirkraum (Siedlungs- und Verkehrsflächen), Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) und Kaltluftprozessgeschehen (vgl. Abbildung 37).

Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich: je höher die Werte, desto dynamischer ist das Kaltluftpaket. Die flächenhafte Auflösung



der Darstellung entspricht unmittelbar der Modellausgabe⁵ (5 m x 5 m). Im Wirkraum ist die absolute Lufttemperatur für den bodennahen Bereich (2 m über Grund) flächenhaft dargestellt, wobei gilt: je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt. Die Abgrenzung des Siedlungsraums ist wie in der Planungshinweiskarte vektorbasiert und beruht auf der Luxembourg Land Use Geodatabase (Ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement durable & Ministère de l'Énergie et de l'Aménagement du territoire, 2023).

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch mehrere Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 11). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 100 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können den Geo-Datensätzen zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden. Die als **Kaltluftentstehungsgebiete** gekennzeichneten Räume sind zusammenhängende Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 25 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten bestimmte Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in der Region Pro Sud von besonderer Bedeutung sind. Hierzu zählen zum einen die linienhaften **Kaltluftleitbahnen**. Kaltluftleitbahnen verbinden kaltluftproduzierende Ausgleichsräume und Wirkräume miteinander und sind mit ihren meist hohen Kaltluftvolumenströmen elementarer Bestandteil des Kaltluftprozessgeschehens. Gleichzeitig sind sie aufgrund ihrer räumlich begrenzten Breite (mindestens 50 m, vgl. Mayer et al. 1994) aber auch hochgradig anfällig gegenüber Flächenentwicklungen in ihren Kern- und Randbereichen, die zu einer Verengung des Durchflussquerschnittes und einer erhöhten Rauigkeit und damit zu einer Funktionseinschränkung bzw. zu einem Funktionsverlust führen können.

Die Grünflächen an der Alzette begünstigen die Kaltluftleitbahn, welche von Südosten her von den Grünflächen des Naturschutzgebiets Brucherbiertg-Lalléngertg gespeist wird, dann aber auf dem Gelände der Gewerbefläche von Arbed Esch-Schiffange zum Erliegen kommt. Aus Westen kommend wird Kaltluft zentriert als Leitbahn entlang der Dipbech in die zentralen Gebiete von Esch-sur-Alzette geliefert. Diese versiegt mit zunehmender Baudichte in Richtung Zentrum jedoch auf Höhe des Campus Wobrücken. Aus dem Park Um Belval fließt zudem Kaltluft an die Siedlungsbereiche heran, zentriert sich hier zu einer Leitbahnstruktur durch Gebäudekörperstellung entlang dem Boulevard du Jazz, aber versiegt dann durch die Blockadewirkung der Gebäude östlich der B40. Zwei weitere Leitbahnen, deren Kaltluft allerdings im Außenbereich von Esch-sur-Alzette versiegt, strömen aus nördlichen Richtungen einmal entlang der Grünflächen nördlich des Match Esch sur Alzette südlich der B40 und aus den Grünflächen nördlich der A4 kommend entlang der 4d, unterstützt durch Kaltluft aus den chemins de Fer Lankelz asbl in südliche Richtungen. Durch Baustrukturen oder Wärmeinselausprägung der Gewerbeflächen versiegen beide Leitbahnen jedoch nach wenigen Metern Eindringtiefe in die bebauten Bereiche von Esch-sur-Alzette.

Flächenhafte **Kaltluftabflussbereiche** sind in Vergleich zu Kaltluftleitbahnen nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie ausschließlich auf wenig dynamischen Flurwinden basieren. Die für Esch-sur-

⁵ Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung über die Funktion „bilineare Interpolation“, die den Wert der vier naheliegendsten Eingabezellzentren nutzt, um den Wert auf dem Ausgabe-Raster zu bestimmen. Der neue Wert für die Ausgabezelle ist ein gewichteter Durchschnitt dieser vier Werte.



Alzette festgestellten flächenhaften Kaltluftabflüsse treten ausschließlich im Gefälle auf und reagieren aufgrund der zumeist gegebenen Ausweichmöglichkeiten der Luft deutlich robuster auf ein moderates Maß an baulichen Entwicklungen. Eine Einschränkung der klimaökologischen Funktionen ist aber bei besonders intensiven Flächenentwicklungen oder unter besonderen Nutzungsbedingungen (z.B. Bebauung einer ansonsten von Wald umschlossenen Freilandfläche an einem Hang) möglich und zu vermeiden. In der Realität sind die hier vorgenommenen Abgrenzungen zwischen flächenhaftem Abfluss und linearer Leitbahn nicht immer eindeutig und/oder gehen ineinander über, sodass den vorgenommenen gutachterlichen Einschätzungen ein Generalisierungseffekt innewohnt, der im konkreten Einzelfall ggf. intensiver zu prüfen ist.

Eine Fläche mit **Parkwind**- Phänomen (Kaltluft strömt aus einer umbauten Grünfläche heraus in die umgebende Bebauung) ist auf der Brachfläche westlich der B40 und nördlich der Rue Samuel Beckett zu finden. Sowohl innerörtliche Kaltluftflüsse als auch Parkwinde sind grundsätzlich schwächer ausgeprägt als diejenigen im Ausgleichsraum bzw. am Siedlungsrand, stellen aber wichtige Kaltluftversorgungsstrukturen dar, die entsprechend empfindlich auf bauliche Maßnahmen reagieren.

Die Ausweisung der Leitbahnen und Austauschbereiche erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein. Darüber hinaus ist die Ausweisung der Kaltluftprozesselemente auch unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung im Wirkraum. Folglich sind zunächst auch solche Prozesse über die Pfeilsignaturen akzentuiert worden, die auf reine Gewerbeflächen oder Sondernutzungen zielen. Eine Berücksichtigung dieser Nutzungsstrukturen erfolgte im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Planungshinweiskarte (vgl. Kapitel 6).

Tabelle 9: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten.

Legendenelement	Ableitungsmethode
Kaltluftentstehungsgebiete	Bereiche (im Ausgleichsraum) mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> \text{ca. } 32,5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$
Fließrichtung der Kaltluft	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von $> 0,1 \text{ m/s}$
Kaltluftleitbahn (linear) in Richtung Siedlungsraum	Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
flächenhafte Kaltluftabflüsse in Richtung Siedlungsraum	Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Innerörtliche Kaltluftabflüsse	Kühlende Ausgleichsströmung im überbauten Bereich (über Straßen, Plätze, innerstädtischen Grünflächen). Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Parkwinde	Kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche heraus. Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

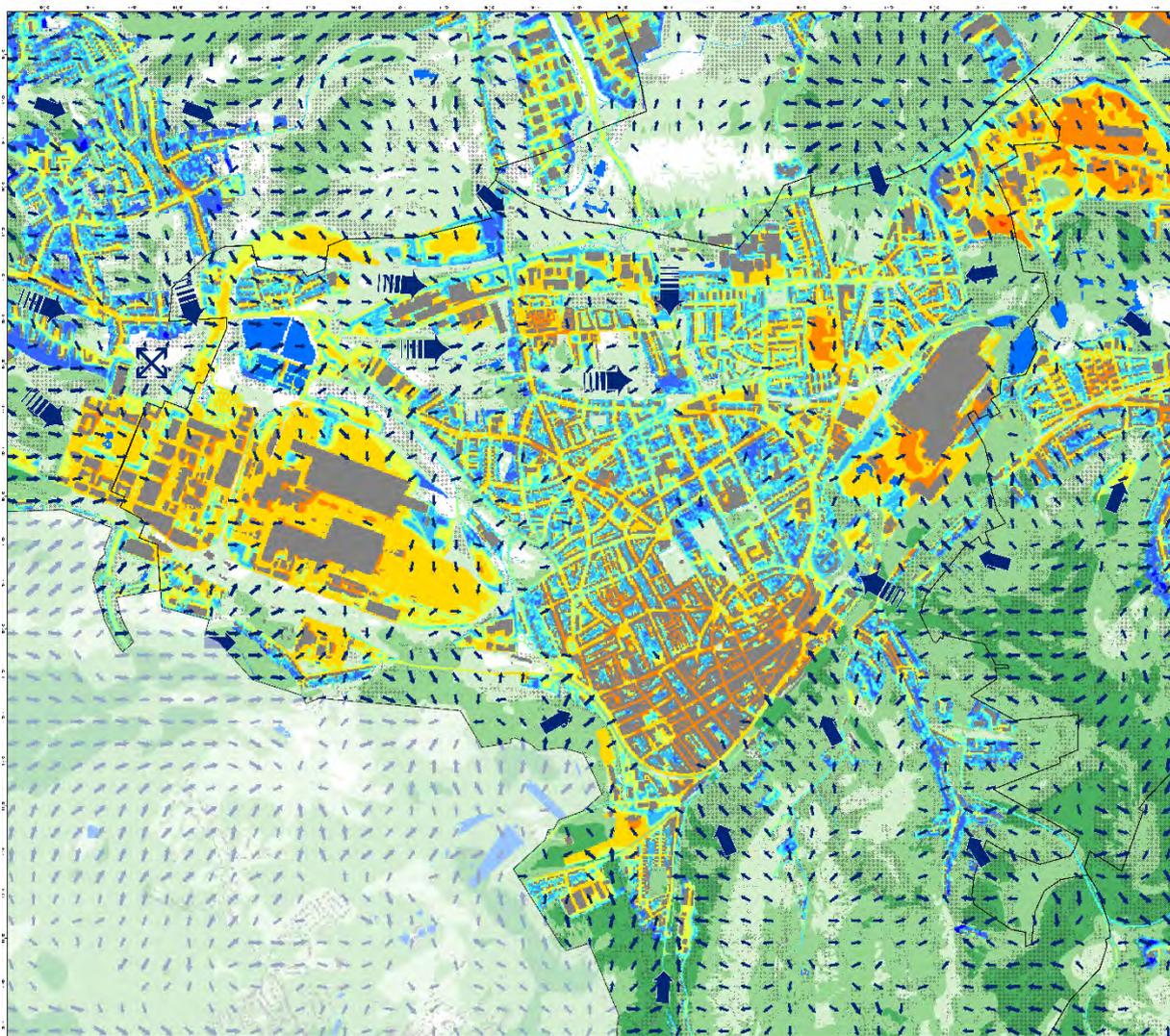


Abbildung 38: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für die Ist-Situation (Legende: siehe Abbildung 37).

5.4 WÄRMEBELASTUNG AM TAGE

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die **PET** eine höhere Spannweite im Untersuchungsgebiet auf. Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit den geringsten PET-Werten von bis zu 23 °C ab (keine Wärmebelastung; vgl. Tabelle A 3 im Anhang). Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass vor allem die stadtnahen Waldflächen als Rückzugsorte dienen können (Abbildung 39). Die größtenteils landwirtschaftlich genutzten, weitgehend baumlosen Freiflächen im Außenraum zeigen zum Auswertzeitpunkt 14 Uhr PET-Werte um rund 40 °C (Ist-Situation) bzw. 44 °C (Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die Beurteilung der zukünftigen Hitzebelastung neben der absoluten Zunahme der Temperatur, vielmehr die Zunahme der Häufigkeit von heißen Tagen (vgl. Tabelle 4 in Kapitel 3.3) entscheidend ist.

Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Entscheidend für die Hitzebelastung am Tage ist der Versiegelungsgrad, die Baumasse sowie die Verschattung vor Ort durch Baustrukturen und Bäume, wobei Bäume zusätzliche Kühlung durch den Verdunstungsprozess liefern. Große Waldflächen können außerdem auch am Tage im Nahbereich kühle Ausgleichsströmungen liefern, wobei die Luft-Austauschprozesse nie die Dimensionen der Nachtsituation erreichen. Die ungünstigsten Bedingungen treten über versiegelten Plätzen ohne Verschattung auf, wie sie in der Innenstadt (Marktplatz vor der Administration

Communale d'Esch-sur-Alzette) und teilweise auf den versiegelten, baumlosen Flächen der Gewerbegebiete zu finden sind (ca. 41 bis 43 °C PET in der Ist-Situation, bzw. 44 bis 46 °C PET im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). Im Zentrum von Esch-sur-Alzette sorgen die hohen Gebäude der engen Straßen und Gassen aber auch für Schattenwurf und damit relativ kühle Verhältnisse. Auf der Nord- bis Nordost-Seite der Gebäude ist durch den Schattenwurf zum Zeitpunkt 14 Uhr entsprechend der PET Wert deutlich kühler als auf den Flächen, welche sich in der vollen Sonneneinstrahlung befinden. So ist beispielsweise die Rue des Charbons zumindest auf der westlichen Seite zum Tageszeitpunkt der größten Wärmeentwicklung fast komplett im Schatten und weist dort nur ca. 34 °C bzw. 37 °C PET (Ist-Situation bzw. Zukunftsszenario „starker Klimawandel“) auf, während die voll angestrahlte Ost-Seite PET Werte um bis zu 43 bzw. 45 °C erreicht.

Als Bereiche relativ niedriger PET-Werte (um 25 °C in der Ist-Situation, bzw. rund 3 bis 4 °C wärmer im Szenario „starker Klimawandel“) stellen sich der Parc Laval, unter den großkronigen Bäumen/Baumgruppen entlang der Place de Lodève, Park Clair-Chêne sowie die direkt an die Siedlung angrenzende Flächen des Naturschutzgebiets Brucherbiert-Lalléngerbiert dar (vgl. Abbildung 39).

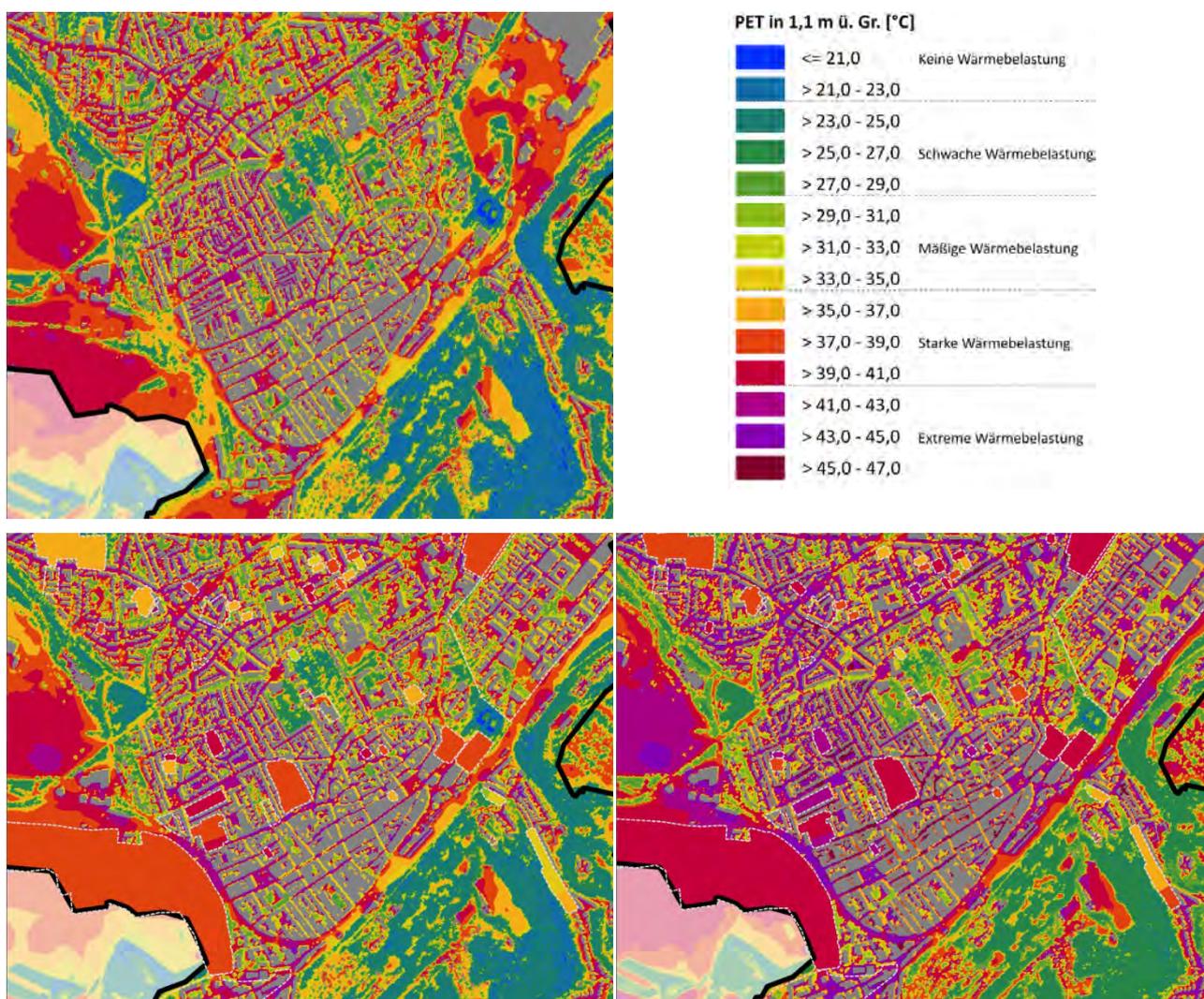


Abbildung 39: Wärmebelastung am Tag (PET) in der Kernstadt von Esch-sur-Alzette und Umgebung. Oben: Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“, unten rechts: Zukunftsszenario „starker Klimawandel“.



Auch Gewässer wirkend am Tag kühlend auf ihre Umgebung, sodass die angrenzenden Grünflächen entlang der Ufer der Alzette, besonders in Kombination mit Vegetation entsprechender Höhe eine leicht reduzierte PET im Vergleich zu weiter entfernten Flächen aufweisen und damit – zumindest vom PET-Wert her – oft eine gute Aufenthaltsqualität am Tage bieten.



6. Bewertungen und Planungshinweiskarte

6.1 GRUNDLAGEN

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte (PHK). Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich dabei um eine „*informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält*“ (VDI 2015, 5). Der Begriff der Planungsrelevanz wird in der Richtlinie noch weiter konkretisiert als „*Bewertung von (Einzel-)Flächen hinsichtlich ihrer Klimafunktionen, aus der Maßnahmen zum Schutz oder zur Verbesserung des Klimas abgeleitet werden. Planungsrelevant sind dabei alle thermischen und lufthygienischen Phänomene, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten oder Ausprägungen signifikant abweichen [...] und die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen haben*“ (VDI 2015, 5-6).

Kerngegenstand der Planungshinweiskarte ist die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Gemäß dem in der Richtlinie definierten Stand der Technik ist zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen sowie Wälder mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen im Siedlungsraum (mit potenziellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen, im Folgenden „Wirkraum“ genannt) zu unterscheiden. Die Richtlinie schlägt eine 3-stufige Bewertung im Ausgleichsraum sowie eine 4-stufige Bewertung im Wirkraum (inkl. RGB-Farbcodes für die verschiedenen Klassen) vor und gibt qualitative Hinweise zu ihrer Ableitung. Ferner wird empfohlen, den flächigen Bewertungen punktuell „raumspezifische Hinweise“ zu Begrünungsbedarfen im Stadt- und Straßenraum sowie zu verkehrlich bedingten Schadstoffbelastungspotentialen für Hauptverkehrsstraßen an die Seite zu stellen. Als „erweiterte Aufgaben“ definiert die VDI-Richtlinie seit ihrer letzten Überarbeitung die Berücksichtigung des Klimawandels sowie der Umweltgerechtigkeit. Eine über den Hinweis, dies ggf. über eigenständige Themenkarten zu lösen, hinausgehende Hilfestellung wird jedoch nicht gegeben.

Die Planungshinweiskarte entfaltet – anders als beispielsweise Luftreinhalte- oder Lärmaktionspläne – keinerlei rechtliche Bindungskraft und unterliegt keiner Planzeichenverordnung. Daraus folgt zum einen, dass begründet auch von den Vorschlägen in der Richtlinie abgewichen werden kann, solange der Grundgedanke erhalten bleibt. Zum anderen bedeutet dies, dass Inhalte und Hinweise vollumfänglich der Abwägung zugänglich sind, sofern sie nicht gänzlich oder in Teilen in verbindliche Planwerke übernommen werden (z.B. dem Flächennutzungsplan oder insbesondere dem Bebauungsplan). Es wird jedoch vorausgesetzt, dass bei entsprechender Abwägung die Abweichung auch fundiert begründet werden kann.

Aufgrund der Komplexität der Planungshinweiskarte, die sowohl Informationen zur Tag- und Nachtsituation als auch zu Ist- und Zukunftsszenarien in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellen muss, ist es nötig, vorgelegt unterschiedliche Bewertungen vorzunehmen. Jede Teilfläche wird getrennt für die Tag- und Nacht-Situation jeweils bewertet für die drei Szenarien Status quo, schwacher Klimawandel und starker Klimawandel. Die Planungshinweiskarte fasst die Ergebnisse dieser sechs Bewertungen zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo im Untersuchungsgebiet der Region Pro Sud Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten.

6.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. Kapitel 5) erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Bewertungen und daraus abgeleitete



planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die human-bioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadtraum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

- flächendeckend für das Untersuchungsgebiet vorliegen
- möglichst aktuell sein und einer standardisierten Fortschreibung unterliegen
- eine eindeutige Einteilung zwischen klimaökologischen Ausgleichs- und Wirkräumen erlauben
- passfähig sowohl für den gesamtstädtischen Maßstab als auch für den hochauflösenden Analyseansatz sein, also weder zu kleinteilig noch zu grob ausfallen

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene in der Regel nicht. Mit den in der Luxembourg Land Use Geodatabase (Ministère de l’Environnement, du Climat et du Développement durable & Ministère de l’Énergie et de l’Aménagement du territoire, 2023) definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine Grundlage, die gutachterlich weiterqualifiziert wurde. Dabei wurden sowohl sehr kleinräumige Strukturen zusammengefasst (vorrangig im Außenbereich bzw. Ausgleichsraum) als auch größere zusammenhängende Flächen in kleinere Funktionseinheiten aufgeteilt (vorrangig im Wirkraum). Es kann unter Umständen vorkommen, dass kleinere Freiflächen in der Karte nicht als solche ausgewiesen sind, oder Überbauungen mit einem hohen Grünanteil nicht als Siedlungsflächen ausgewiesen sind. Im Falle zusätzlicher Bebauung auf Grün- und Freiflächen kann sich deren Funktion ändern und muss gegebenenfalls neu bewertet werden.

Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Bewertung der Flächen bzw. zur Ableitung von Wertstufen mithilfe eines statistischen Raummittels aus allen, die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor; Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Da alle Teilflächen der Basisgeometrie einen größeren Flächeninhalt als 25 m² (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel sowohl höhere als auch niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 40).

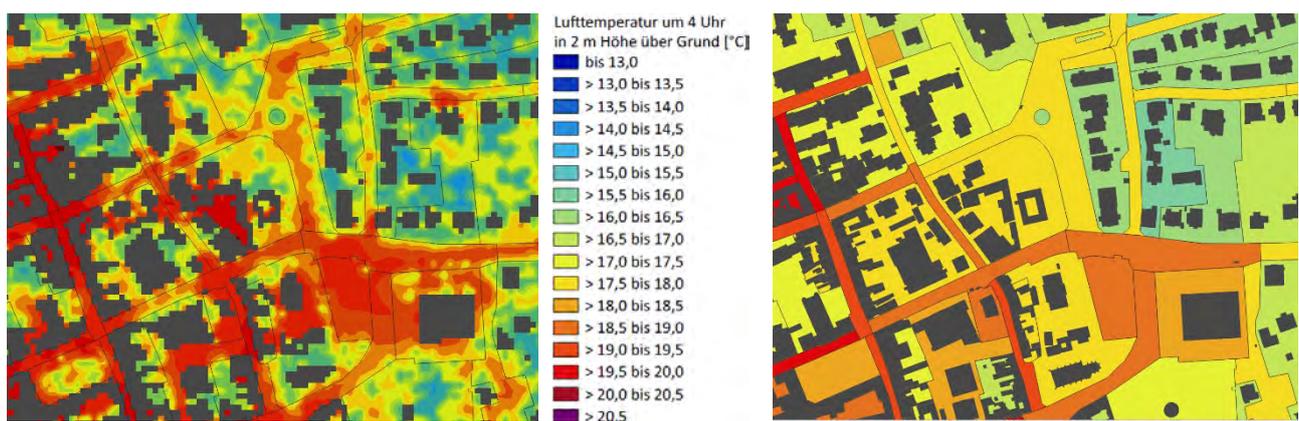


Abbildung 40: links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie



6.3 BEWERTUNGEN DER WIRK- UND DER AUSGLEICHSRÄUME

6.3.1 WIRKRAUM

Im Wirkraum wird die thermische Belastungssituation bewertet. Wertgebend dabei ist in der Nacht die bodennahe Lufttemperatur als starker Indikator für den Schlafkomfort in Gebäuden sowie am Tag die Wärmebelastung im Außenraum (Physiologisch Äquivalente Temperatur, PET). Bei der Temperatur und der PET, die auf die Flächen der Basisgeometrie gemittelt wurden, handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb „sommerliche autochthone Wetterlage“ gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb eines Sommers sowie selbst innerhalb der zu betrachtenden Wetterlage auch deutlich wärmere oder kühlere Situationen. Die Planungshinweiskarte muss den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situationen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen gemessenen) Werte definiert. Bei der sogenannten z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierende z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 41).

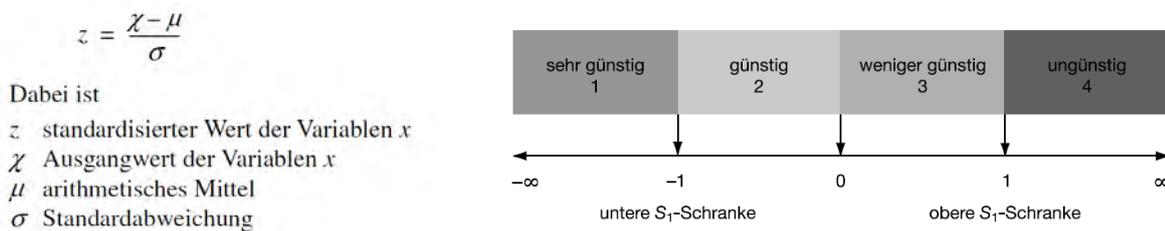


Abbildung 41: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

Dem Bewertungsverfahren liegt also ein relativer Ansatz zugrunde, bei dem nicht nach universell gültigen (ggf. rechtlich normierten) Grenzwerten gefragt wird, sondern bei dem das auftretende Wertespektrum konkret für den analysierten Raum den Bewertungsmaßstab bildet. Das grundsätzliche Vorliegen von (hier: thermischen) Belastungen muss dabei als Prämisse zuvor abgeleitet worden sein. Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Verfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum in der vorliegenden Planungshinweiskarte. Die Methode ist für die vergleichende Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb eines festen Zeitschnitts ausgelegt (typischerweise den Status quo). Sollen mehrere zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die insgesamt drei Modellrechnungen (Status quo und die Szenarien Schwacher sowie Starker Klimawandel) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperatur- bzw. PET-Werten ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden zunächst die Statistiken des Status quo (als



kühlste Situation) und des Szenarios Starker Klimawandel (als wärmste Situation) als Bandbreiten des „Szenario-Trichters miteinander verknüpft. Aus dieser neuen Grundgesamtheit über beide Situationen ergeben sich folgende statistische Werte für die z-Transformation⁶:

- Nächtliche Temperatur für den Siedlungsraum:
 Mittelwert = 18,451 °C Standardabweichung = 2,049 °C
- Wärmebelastung am Tag für den Siedlungsraum:
 Mittelwert = 37,559 °C PET Standardabweichung = 5,272 °C PET

Das an den Bandbreiten der auftretenden Werte orientierte Vorgehen eröffnet die Möglichkeit, Bewertungen für beliebige Konstellationen innerhalb dieser Bandbreiten auch im Nachgang zu der vorliegenden Analyse durchzuführen.

Klassifizierung der bioklimatischen Situation

Abweichend von der in der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 vorgeschlagenen vierstufigen Bewertung (Abbildung 41) wurde in der vorliegenden Untersuchung die bioklimatische Situation im Wirkraum in fünf Klassen eingeteilt, um der hohen räumlichen Auflösung der Modellergebnisse und der damit verbundenen stärkeres Differenzierung der thermischen Belastung Rechnung zu tragen. Sowohl für die Nacht- als auch für die Tag-Situation wurden Siedlungsflächen und der öffentliche Raum (Wohn- und Gewerbegebiete, Straßen und Plätze) in die Klassen *sehr geringe – geringe – mittlere – hohe – sehr hohe* bioklimatische Belastung eingeteilt (Tabelle 12). Die Abgrenzung erfolgte über die z-Transformation mit gleich großen, um den Mittelwert (z = 0) schwankenden Klassen.

Tabelle 10: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

	Bioklimatische Belastung am Tag	Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
	Sehr gering	$z \leq -0,75$	$PET \leq 33,6$
	Gering	$-0,75 < z \leq -0,25$	$33,6 < PET \leq 36,2$
	Mittel	$-0,25 < z \leq 0,25$	$36,2 < PET \leq 38,9$
	Hoch	$0,25 < z \leq 0,75$	$38,9 < PET \leq 41,5$
	Sehr hoch	$z > 0,75$	$PET > 41,5$

In der Darstellung der Nachtsituation wird neben der Überwärmung zusätzlich auf den Kaltlufthaushalt eingegangen. Zu einem gewissen Anteil wirkt sich die Kaltluft bereits auf die nächtliche Lufttemperatur in den einzelnen Flächen aus. Sie wird dennoch zusätzlich beleuchtet, da sich die Durchlüftung einer Fläche positiv auf angrenzende Flächen auswirken kann. Dazu wurden zunächst Siedlungsflächen mit einer überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstromdichte ($\geq 12,43 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) als sogenannter Kaltlufteinwirkbereich definiert. Liegt eine Fläche mindestens zur Hälfte im Kaltlufteinwirkbereich, so wird angenommen, dass die Fläche potenziell eine Gunstwirkung für angrenzenden Flächen haben kann. Diesen Flächen wird eine Klimafunktion zugeschrieben, welche als Kriterium für die stadtklimatische Handlungspriorität in die Planungshinweiskarte einfließen.

⁶ Zur Erzeugung dieser Werte wurden ausschließlich solche Gitterpunkte aus den Modellergebnissen verwendet, die innerhalb des Siedlungsraums liegen (Wohn- und Gewerbegebiete sowie Straßenraum), da sie die zu vergleichende Gebietskulisse zur Bewertung der thermischen Situation bilden. Die Temperaturen im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt.



Tabelle 11: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation in der Nacht

Bioklimatische Belastung in der Nacht	Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige Temperaturen (T04) [°C]
Sehr gering	$z \leq -1,0$	$T04 \leq 16,4$
Gering	$-1,0 < z \leq -0,2$	$16,4 < T04 \leq 18,0$
Mittel	$-0,2 < z \leq 0,2$	$18,0 < T04 \leq 18,9$
Hoch	$0,2 < z \leq 1,0$	$18,9 < T04 \leq 20,5$
Sehr hoch	$z > 1,0$	$T04 > 20,5$

6.3.2 AUSGLEICHSRAUM

Während in den Klimaanalysekarten die dem Ausgleichsraum zugehörigen Grün- und Freiflächen, landwirtschaftlichen Flächen und Wälder vornehmlich siedlungsunabhängig anhand ihres Kaltluftliefervermögens gekennzeichnet werden, steht in den Bewertungs- und der Planungshinweiskarte deren stadtklimatische Bedeutung sowie die Ableitung der Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt.

Zur stadtklimatischen Bewertung des Ausgleichsraums in der Nacht rückt dessen Funktion für den Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit den besonderen Kaltluftprozessen (Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüsse) stehende Fläche automatisch eine *sehr hohe Bedeutung*. Im Hinblick auf planungsrelevante Belange spielt zusätzlich der Siedlungsbezug der Flächen im Ausgleichsraum eine Rolle. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb des Ausgleichsraums entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Die folgende Abbildung 42 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischer Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- ‚Im Nahbereich zu Wohnsiedlungen‘: Entfernung bis 250 m Luftlinie
- ‚in Agglomeration‘: geschlossener Siedlungsraum (ohne Splitterflächen, Einzelhöfe etc. im Außenraum; gutachterliche Einteilung)
- ‚Siedlungsbezug‘: Entfernung bis 500 m Luftlinie

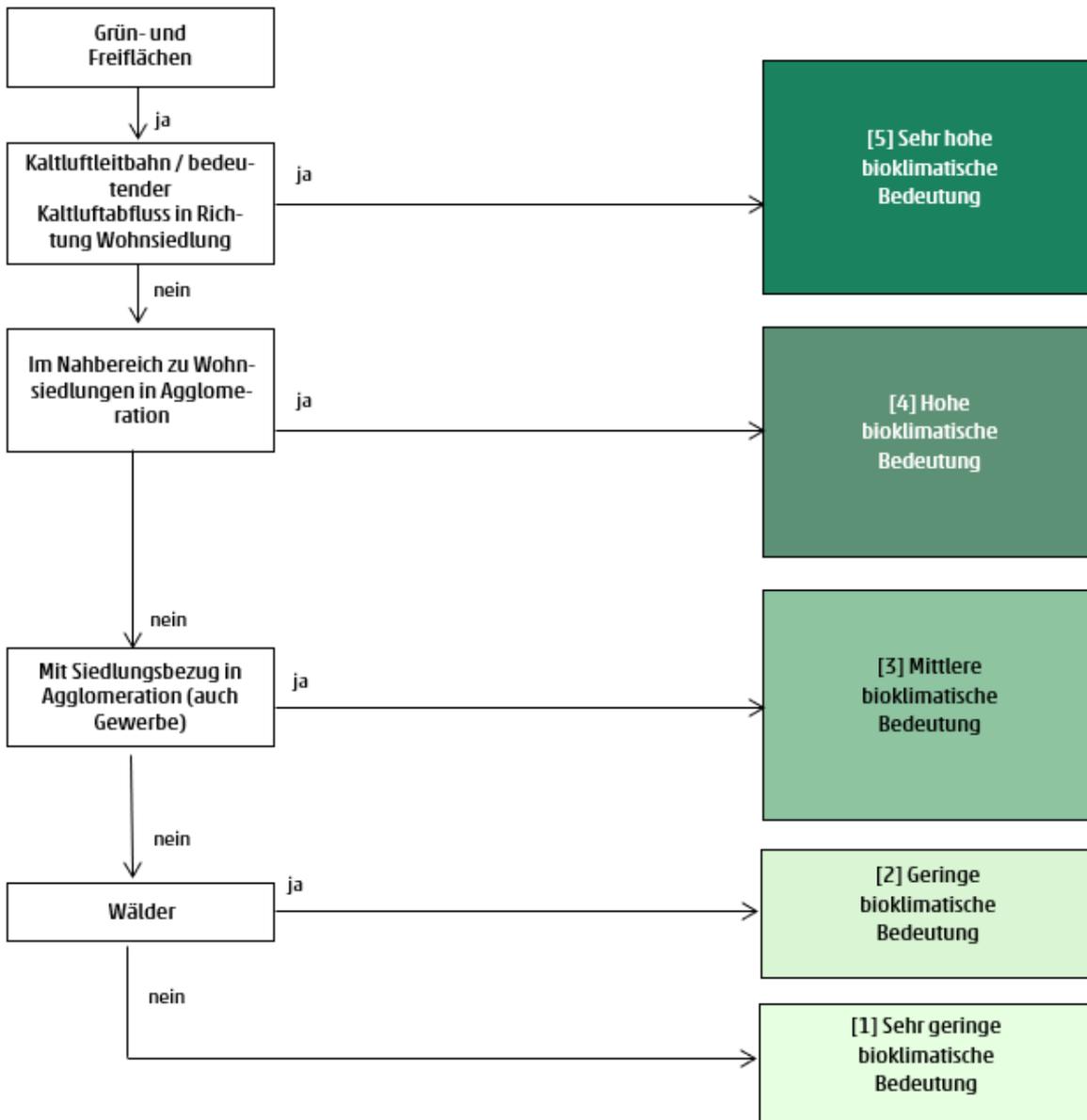


Abbildung 42: Schema der stadtklimatischen Bewertung von Flächen im Ausgleichsraum in der Nacht (*Schéma d'évaluation de l'importance des espaces verts pour la situation nocturne*)

Für die Tag-Situation wird die bioklimatische Bedeutung (Aufenthaltsqualität) auf den Flächen im Ausgleichsraum in einer fünfstufigen Skala von *sehr hoch* bis *sehr gering* bewertet (Tabelle 14). Dies geschieht wiederum über die oben beschriebene z-Transformation, der folgende statistische Werte zugrunde lagen (Flächenkulisse: alle Ausgleichsräume im Untersuchungsgebiet Region Pro Sud):

- bioklimatische Bedeutung am Tag: Mittelwert = 32,465 °C PET / Standardabweichung = 7,221 °C PET

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag im gesamten Untersuchungsgebiet, sodass die Aufenthaltsqualität auf den Flächen im Ausgleichsraum sinken kann. Damit nimmt die Anzahl ungünstig bewerteter Flächen zu, was jedoch nicht meint, dass deren Bedeutung für das Stadtklima abnimmt. Vielmehr ist es ein Hinweis darauf, dass die Wärmebelastung auf den Flächen ohne Aufwertung und angepasste Pflege zunehmen wird. Sie behalten jedoch eine wichtige stadtklimatische Ausgleichsfunktion für den stärker belasteten Siedlungsraum.



Tabelle 12: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

Aufenthaltsqualität / bioklimatische Bedeutung an Sommertagen	Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
Sehr hoch	$z \leq -0,75$	$PET \leq 27,0$
Hoch	$-0,75 < z \leq -0,25$	$27,0 < PET \leq 30,7$
Mittel	$-0,25 < z \leq 0,25$	$30,7 < PET \leq 34,3$
Gering	$0,25 < z \leq 0,75$	$34,3 < PET \leq 37,9$
Sehr gering	$z > 0,75$	$PET > 37,9$

6.3.3 ERGEBNISSE DER EINZEL-BEWERTUNGEN

Tabelle 15 zeigt die Flächenanteile der jeweiligen Belastungskategorien der Siedlungsflächen für die **Nachtsituation**. In der Ist-Situation und im Szenario „schwacher Klimawandel“ ist die Kategorie „*sehr hohe* Belastung“ nicht belegt. Im Szenario „starker Klimawandel“ erhalten hingegen ein Viertel aller Siedlungsflächen diese Bewertung. Grund dieser Verteilung ist der relativ geringe Temperaturunterschied zwischen Ist-Situation und Szenario „schwacher Klimawandel“ bzw. der im Vergleich hohe Temperaturunterschied zwischen dem Szenario „schwacher Klimawandel“ und „starker Klimawandel“. Flächen mit *hoher* Belastung in der Nacht sind in der Ist-Situation vor allem großflächig Industriegebiete in Bettembourg, Differdingen und Esch-sur-Alzette (3,5 % Flächenanteil). Im Szenario „starker Klimawandel“ sind bereits rund 80 % der Siedlungsflächen mit *hoher* oder *sehr hoher* bioklimatischer Belastung nachts belegt. Die Flächen mit *mittlerer* oder *geringer* Belastung im Szenario „Starker Klimawandel“ befinden sich in an den Siedlungsrändern sowie in locker bebauten dörflichen Siedlungen mit Einzelhausbebauungen. Während letztgenannte Flächen in der Ist-Situation (Status Quo) noch als *sehr gering* belastet eingestuft werden, wird diese Kategorie im Szenario „starker Klimawandel“ nicht mehr belegt.

Das Bewertungsschema für den Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) basiert auf den Kaltluftprozessen, und der jeweiligen Lagebeziehung mit umliegenden (Wohn-)siedlungsflächen (vgl. Abbildung 42). Folglich liegen die Flächen mit *hoher* oder *sehr hoher* bioklimatischer Bedeutung, in ihrer Funktion als Kaltluftaustauschflächen direkt angrenzend an Wohnsiedlungsflächen. In den Zukunftsszenarien kommen die städtebaulichen Entwicklungsflächen mit ihrem jeweiligen Belastungsgrad als zusätzlicher Wirkraum dazu, und die angrenzenden Grün- und Freiflächen bekommen jeweils eine höhere bioklimatische Bedeutung als Ausgleichsraum bzw. Kaltluftlieferant in der Nacht zugeordnet. Zwischen den beiden Zukunftsszenarien ergibt sich aufgrund der identischen Bebauungsstruktur kein Unterschied in den Bewertungen der bioklimatischen Bedeutung der Ausgleichsraumflächen in der Nacht. Die Gesamtfläche des Ausgleichsraums im Untersuchungsgebiet reduziert sich in den Zukunftsszenarien um ca. 5,3 %. Flächen die in der Ist-Situation noch mit *sehr hoher* Bedeutung für die angrenzenden Siedlungsflächen belegt sind, fallen teilweise in den Zukunftsszenarien weg. Als Folge ist der Anteil der Ausgleichsflächen mit sehr hoher Bedeutung in den Zukunftsszenarien leicht niedriger (12,0 anstatt 13,5 %, vgl. Tabelle 14). Flächen mit *hoher* Bedeutung nehmen hingegen um ca. 1 % zu.

Bei den Ausgleichsflächen mit sehr geringer bioklimatischer Bedeutung für das Stadtklima (in allen Szenarien ca. 9 %) handelt es sich um die meist großflächigen landwirtschaftlichen Flächen im Umland, mit Abstand zur Siedlungsfläche (ausgenommen Einzelhöfe als Siedlungssplitterflächen) von mindestens einigen Hundertmetern.



Tabelle 13: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung in der Nacht, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Belastung in der Nacht	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „schwacher Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	31,5 %	7,7 %	0,0 %
Gering	49,2 %	52,0 %	3,5 %
Mittel	15,8 %	23,5 %	15,9 %
Hoch	3,5 %	16,8 %	54,7 %
Sehr hoch	0,0 %	0,1 %	25,9 %

Tabelle 14: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die Wohnsiedlung in der Nacht, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Bedeutung in der Nacht	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „schwacher Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	9,4 %	9,2 %	9,2 %
Gering	15,0 %	15,3 %	15,3 %
Mittel	25,1 %	25,2 %	25,2 %
Hoch	37,1 %	38,2 %	38,2 %
Sehr hoch	13,5 %	12,0 %	12,0 %

Grundsätzlich verteilen sich **am Tage** die Flächen unterschiedlichen bioklimatischen Belastungsgrades mosaikartig im gesamten Untersuchungsgebiet, meist abhängig von Verschattungsgrad durch Bäume und Baustrukturen sowie Baumasse und Versiegelungsgrad insgesamt. Die Kategorie *sehr hohe bioklimatischen Belastung* ist wiederum in der Ist-Situation und dem Szenario „schwacher Klimawandel“ kaum belegt (vgl. Tabelle 15). Bei den *hoch* belasteten Siedlungsflächen am Tage (ca. 8 % in der Ist-Situation, 16 % im Szenario „schwacher Klimawandel“) handelt es sich sowohl um stark versiegelte Industrie- und Gewerbeflächen sowie Parkplätze als auch vereinzelt um locker bebaute Wohnsiedlungsflächen mit wenig Baumbestand. Im Szenario „starker Klimawandel“ sind 60 % der Siedlungsflächen mit hoher oder sehr hoher bioklimatischer Belastung am Tage bewertet. Die ca. 10 % Flächenanteile mit *geringer* oder *sehr geringer* Belastung liegen hier im gesamten Untersuchungsgebiet verstreut vor allem (aber nicht ausschließlich) an Siedlungsrändern, in Bereichen mit hohem Baumbestand in Kombination mit günstiger Durchlüftung oder in direkter Waldnähe.

Die Grün- und Freiflächen verlieren in Folge der Zunahme der PET-Werte in den Zukunftsszenarien an Erholungsfunktion für den Menschen am Tage. In der Ist-Situation werden 36,5 % mit sehr hoher bioklimatischer Bedeutung eingestuft – hierbei handelt es sich ausnahmslos um Waldflächen bzw. Flächen mit hohen Bäumen. Im Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“ erhöht sich der Flächenanteil um 0,7 Prozentpunkte aufgrund der insgesamt um 5,3 % kleineren Gesamtfläche des Ausgleichsraums. Zum Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ reduziert sich der Flächenanteil auf 33 %. Tabelle 16 zeigt die Zusammenfassung der Flächenanteile. Der Anteil der Flächen mit *sehr geringer* bioklimatischer Bedeutung am Tage steigt von ca. 14 % in der Ist-Situation auf ca. 42 % im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“.



Tabelle 15: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung am Tage, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Belastung am Tage	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „schwacher Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	16,5 %	8,8 %	2,1 %
Gering	35,9 %	24,2 %	8,5 %
Mittel	39,1 %	50,6 %	29,5 %
Hoch	8,3 %	15,7 %	49,4 %
Sehr hoch	0,2 %	0,7 %	10,6 %

Tabelle 16: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die potenzielle Erholungsfunktion am Tage, nach Modellierungsszenario

Aufenthaltsqualität / bioklimatische Bedeutung an Sommertagen	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „schwacher Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	14,2 %	20,7 %	42,4 %
Gering	33,5 %	29,1 %	13,6 %
Mittel	10,7 %	8,4 %	5,1 %
Hoch	5,0 %	4,8 %	5,9 %
Sehr hoch	36,5 %	37,2 %	33,0 %

6.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

Die Planungshinweiskarte Stadtklima fasst die Ergebnisse der sechs einzelnen Bewertungen (Tag / Nacht, für jeweils die Ist-Situation und zwei Zukunftsszenarien) zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten. Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte eine wichtige fachliche Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse dar.

6.4.1 STADTKLIMATISCHE HANDLUNGSPRIORITÄT IM WIRKRAUM

In den Wohn- und Gewerbeflächen sowie im öffentlichen Raum wird die stadtklimatische Handlungspriorität dargestellt. Für die Einteilung der Handlungsprioritäten wurde in einem ersten Schritt die für die Nacht- und Tagsituation vorgenommene bioklimatische Bewertung kombiniert. In Wohngebieten wurde die Nachtsituation stärker gewichtet (Fokus Schlafqualität) und in unbewohnten Gebieten sowie im Straßenraum und auf Plätzen die Tagsituation (Fokus Aufenthaltsqualität im Außenraum; Tabelle 17).



Tabelle 17: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Situation aus den einzelnen Bewertungen Nacht und Tag in Wohngebieten sowie in unbewohnten Gebieten.

Wohngebiete						Unbewohnte Gebiete, Straßen und Plätze							
Bewertung Nacht						Bewertung Nacht							
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		
Bewertung Tag	1	1	2	3	3	4	Bewertung Tag	1	1	1	2	2	3
	2	1	2	3	4	4		2	2	2	2	3	3
	3	2	2	3	4	5		3	3	3	3	3	4
	4	2	3	3	4	5		4	3	4	4	4	5
	5	3	3	4	5	5		5	4	4	5	5	5

1 = sehr geringe Wärmebelastung, ..., 5 = höchste Wärmebelastung

Beispielsweise wird einem Wohngebiet, welches in der Nacht sehr hoch belastet ist (5), in Kombination mit mittlerer Belastung (3) am Tage eine Gesamt-Wärmebelastung von 5 = am höchsten zugeordnet (vgl. Tabelle 17, linke Seite). Ein Gewerbegebiet mit sehr geringer Belastung (1) in der Nacht und sehr hoher Belastung (5) am Tage wird insgesamt mit hoher (4) Wärmebelastung bewertet (vgl. Tabelle 17, rechte Seite).

Im zweiten Schritt wird die Betrachtung der Zukunfts-Szenarien hinzugezogen und die Klimafunktion der Siedlungsflächen berücksichtigt. Die höchste Handlungspriorität erhalten Flächen, die bereits heute (Status quo) oder dem als *best case* anzusehendem Szenario schwacher Klimawandel die höchste bioklimatische Belastung und keine Klimafunktion (Kaltlufteinwirkungsbereich) aufweisen. Übernehmen die am höchsten belasteten Flächen dagegen eine Klimafunktion, fallen sie in die zweite Handlungspriorität. In der Klasse „Handlungspriorität 2“ liegen die Siedlungsflächen, die unter dem Einfluss des Szenarios Starker Klimawandel die höchste Belastung und keine Klimafunktion verzeichnen. Diese Abstufung setzt sich wie in Tabelle 18 skizziert für die weiteren Handlungsprioritäten fort bis aus stadtklimatischer Sicht keine vorrangige Handlungspriorität mehr abzuleiten ist. Das Handlungserfordernis lässt sich hier mit dem Vorsorgeprinzip begründen und wird je größer, desto erfolgloser die weltweiten Klimaschutzbemühungen in den kommenden Jahren ausfallen. Die Flächen ohne vorrangige Handlungspriorität behalten auch unter der Annahme eines „starken Klimawandels“ ihre günstige humanbioklimatische Situation bei. Sie können als sehr robust gegenüber dem Klimawandel eingestuft werden. Durch diese vorgenommenen Definitionen kann jede auftretende Wertstufenkombination der dreidimensionalen Matrix aus Bestandssituation, „schwacher Klimawandel“ und „starker Klimawandel“ eindeutig einer der Belastungsstufen zugeordnet werden.



Tabelle 18: Methodische Herleitung der stadtklimatischen Handlungsprioritäten und der Anteil an den Flächen des Wirkraums.

Bewertung im Wirkraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
Handlungspriorität 1	Flächen, die bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen und keine Klimafunktion innehaben.	0,3 %
Handlungspriorität 2	Flächen mit Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen ohne Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen	15,6 %
Handlungspriorität 3	Flächen ohne Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen mit Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen	10,6 %
Handlungspriorität 4	Flächen mit Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen ohne Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen	27,6 %
Handlungspriorität 5	Flächen ohne Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine mittlere Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen mit Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen	20,7 %
Handlungspriorität 6	Flächen mit Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine mittlere Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen ohne Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine mittlere Wärmebelastung aufweisen	14,7 %
Keine vorrangige Handlungspriorität	Übrige Flächen	10,6 %

„Klimafunktion“ = mindestens Hälfte der Fläche mit überdurchschnittlicher Kaltluftvolumenstromdichte
 Die Wärmebelastung bezieht sich auf die kombinierte Bewertung aus Tabelle 17

Handlungspriorität 1 und 2 belegen viele Industriegebiete, aber auch Großteile des Zentrums von Esch-sur-Alzette, Schiffingen und Differdingen, sowie viele einzelne Bereiche in den Gemeinden, wo Bewohner direkt betroffen sind.

Die Handlungsprioritäten sollen eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird⁷. Dafür wurden die Handlungsprioritäten in Tabelle 19 mit stadtklimatischen Planungshinweisen versehen. In Flächen der fünf höchsten Handlungsprioritäten, die in der Region Pro Sud ca. 75 % (vgl. Tabelle 18) des Siedlungsraums ausmachen, sind optimierende stadtklimatische Maßnahmen notwendig bzw. zu prüfen. Darunter ist in den Flächen der höchsten beiden Handlungsprioritäten (ca. 16 % Flächenanteil) zusätzlich zu prüfen, ob proaktiv Anpassungsmaßnahmen

⁷ Es können (und sollen im Falle von Gelegenheitsfenstern) also auch stadtklimatischen Anpassungsmaßnahmen bspw. in Flächen der Handlungspriorität 3 umgesetzt werden, wenn noch nicht alle Flächen in den höheren Handlungsprioritäten angepasst wurden.



im Bestand umgesetzt werden können. In einem Viertel des Siedlungsraums besteht eine geringe oder keine vorrangige stadtklimatische Handlungspriorität, für die im Sinne des Vorsorgegedankens jedoch die Einhaltung gewisser klimaökologischer Standards bei Entwicklungen empfohlen wird.

Tabelle 19: Mit den Handlungsprioritäten Stadtklima im Wirkraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Wirkraum	Planungshinweise
Handlungspriorität 1 – 2	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind notwendig und je nach ihrer Wirksamkeit zu priorisieren. Im Bestand ist die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen zu prüfen. Es sollte keine weitere Verdichtung (insbesondere zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
Handlungspriorität 3 – 5	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation werden empfohlen. Je nach Tag- bzw. Nachtsituation sind ggfs. zusätzliche Begrünung und Verschattung sowie Entsiegelung oder Verbesserung der Durchlüftung notwendig. Freiflächen sollten erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
Handlungspriorität 6 bzw. keine vorrangige Handlungspriorität	Die günstige bioklimatische Situation ist auch bei allen baulichen Entwicklungen möglichst zu erhalten oder zu verbessern. Klimaökologische Standards sind bei allen baulichen Entwicklungen einzuhalten (Bäume, Begrünung, geringe Versiegelung usw.)

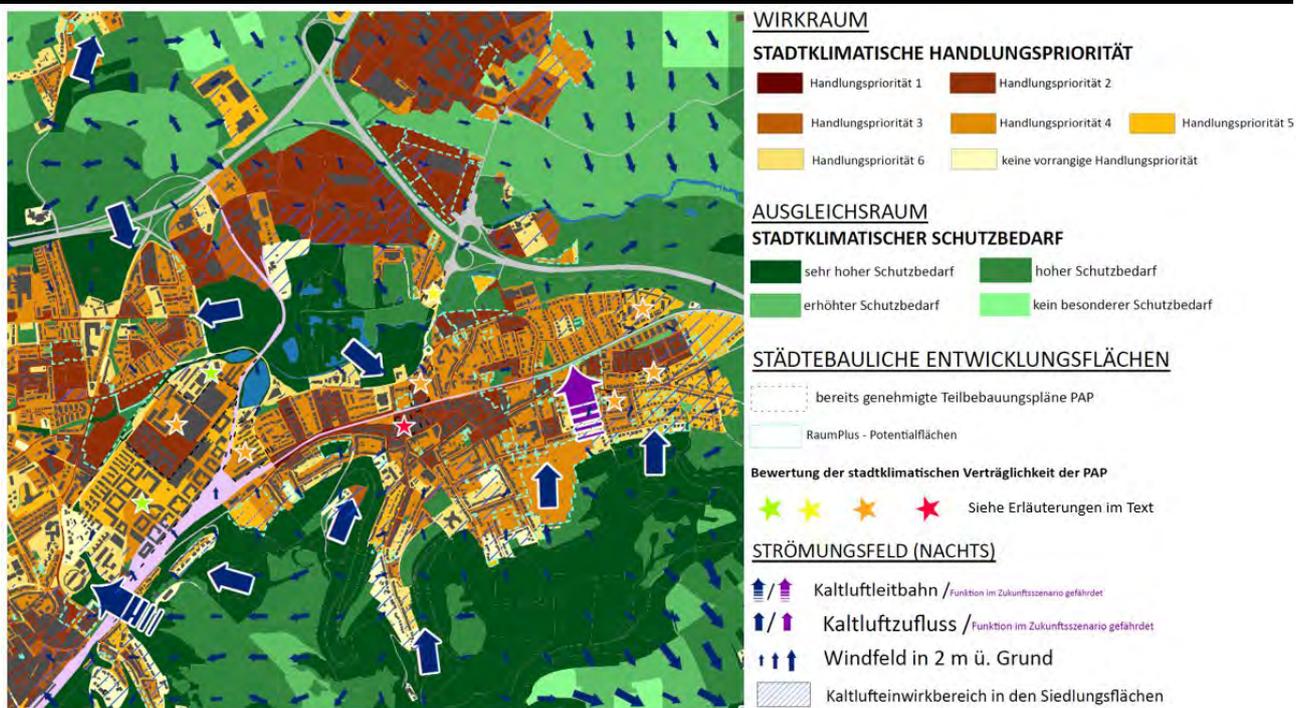


Abbildung 43: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima. Verkürzte Legende (*Carte indicative de planification pour une partie du pays (légende raccourcie)*)



6.4.2 STADTKLIMATISCHER SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSRaum

Die Planungshinweiskarte gibt den stadtklimatischen Schutzbedarf von Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wäldern anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Zur Ableitung des Schutzbedarfs wurden zunächst die Bewertungen von Tag- und Nachtsituation kombiniert (Tabelle 20). Dies erfolgte unter dem Grundsatz, dass eine Fläche, die am Tag oder in der Nacht die höchste Bedeutung aufweist, in fast allen Fällen auch den höchsten Schutzbedarf zugeschrieben bekommt. Tag- und Nachtsituation wurden bei der Kombination gleichwertig behandelt.

Tabelle 20: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Bewertung aus den einzelnen Bewertungen Nacht und Tag für die Flächen im Ausgleichsraum

Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen)						
		Bewertung Nacht				
		1	2	3	4	5
Bewertung Tag	1	1	1	2	3	4
	2	1	2	3	4	5
	3	2	3	3	4	5
	4	3	4	4	4	5
	5	4	5	5	5	5

1 = sehr geringe, ..., 5 = höchste bioklimatische Bedeutung

Beispielsweise wird einer Frei- oder Grünfläche, welche am Tage eine *sehr hohe* Bedeutung (5) aufweist, in Kombination mit *sehr geringer* Bedeutung (1) in der Nacht eine Gesamt-Bedeutung von 4 = *hoch* zugeordnet. Eine Frei- oder Grünfläche mit *hoher* Bedeutung (4) in der Nacht und *geringer* Bedeutung (2) am Tage wird insgesamt ebenfalls mit *hoher* (4) Bedeutung bewertet (vgl. Tabelle 20).

Tabelle 21: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarf und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums.

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
Sehr hoher Schutzbedarf	Höchste stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	38,2 %
Hoher Schutzbedarf	Hohe stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	30,7 %
Erhöhter Schutzbedarf	Mittlere stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	18,7 %
Kein besonderer Schutzbedarf	Übrige Flächen	12,3 %

Die Zuweisung der Schutzbedarfe für die Planungshinweiskarte ist direkt abhängig von der jeweiligen stadtklimatischen Bedeutung.



Flächen, die in mindestens einer der drei Szenarien (Ist, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“) in die Kategorie der höchsten Bedeutung für das Stadtklima fallen, wird der höchste Schutzbedarf zugewiesen (Tabelle 21). Siedlungsferne Flächen (> 1 km Entfernung) mit unterdurchschnittlichen Werten für Kaltluftvolumenstromdichte und Kaltluftproduktionsrate wurden dabei um eine Stufe herabgestuft, aufgrund ihres geringeren Beitrags im Kaltlufthaushalt sowie weniger Funktion als fußläufiger Erholungsraum.

Der hohe Anteil von Flächen mit hohem stadtklimatischen Schutzbedarf (38,2 % aller Flächen im Ausgleichsraum) geht auf die großen siedlungsnahen Waldflächen zurück, die am Tag eine (sehr) hohe Bedeutung aufweisen. Mehr als ein Viertel des Untersuchungsgebietes sind Waldflächen. Aber auch einige landwirtschaftliche Flächen, die an belastete Wohnsiedlungen angrenzen, sowie innerstädtische Parks und Grünzüge, fallen aufgrund ihrer Bedeutung für die nächtliche Kaltluftversorgung in die Kategorie mit sehr hohem Schutzbedarf.

In Abhängigkeit vom Schutzbedarf der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen. Bei einem *sehr hohen Schutzbedarf* wird eine Entwicklung beispielsweise nur dann als stadtklimamaverträglich gewertet, wenn ein Nachweis über die Erhaltung der jeweiligen Funktion erfolgt (z.B. die Funktion als Kaltluftleitbahn oder ihre Wirkung als öffentliche Grünfläche mit hoher Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). Bei der weiteren Abstufung ist die Funktion der jeweiligen Flächen zu beachten, wobei die Art und Größe des Vorhabens im Einzelfall bestimmen, welche Vorgaben zur stadtklimatischen Prüfung einzuhalten sind (Detailgutachten oder qualitative Stellungnahme). Dabei kann die klimafachliche Begleitung einer Planung sowohl von städtischer Seite aus als auch durch externe Gutachter:innen erfolgen.

Tabelle 22: Mit dem stadtklimatischen Schutzbedarf im Ausgleichsraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Ausgleichsraum	Planungshinweise
<div style="background-color: #006400; width: 100%; height: 100%;"></div> <p>Sehr hoher Schutzbedarf</p>	<p>Der Erhalt oder die Verbesserung der stadtklimatischen Funktion ist notwendig und prioritär. Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung oder Verbesserung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung) nachzuweisen. Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich durch Stabstelle 020 zu begleiten. Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens kann dies über eine fachliche Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung erfolgen.</p>
<div style="background-color: #00b050; width: 100%; height: 100%;"></div> <p>Hoher Schutzbedarf</p>	<p>Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung oder Verbesserung der stadtklimatischen Funktion anzustreben (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Einschätzung durch Stabstelle 020 vorzunehmen, bei größeren Vorhaben kann eine modellhafte Untersuchung erforderlich sein.</p>
<div style="background-color: #90ee90; width: 100%; height: 100%;"></div> <p>Erhöhter Schutzbedarf</p>	<p>Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die stadtklimatische Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei größeren Vorhaben ist eine klimafachliche Begleitung durch Stabstelle 020 anzustreben.</p>
<div style="background-color: #e0ffe0; width: 100%; height: 100%;"></div> <p>Kein besonderer Schutzbedarf</p>	<p>Die Flächen weisen für den derzeitigen Siedlungsraum keine besondere stadtklimatische Funktion auf. Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.</p>



6.4.3 STADTKLIMATISCHE BEWERTUNG DER STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN

Den städtebaulichen Entwicklungsflächen wird analog zu allen Siedlungsflächen eine stadtklimatische Handlungspriorität zugewiesen. Zusätzlich sind sie in der Planungshinweiskarte mit einer farblichen Umrandung versehen. Es handelt sich hierbei einerseits um die bereits genehmigten Teilbebauungspläne PAPs (= plans d'aménagement particuliers), welche mit ihren konkreten Planungen in die Eingangsdaten der Zukunftsszenarien-Modellierung eingearbeitet wurden. Darüber hinaus hat das Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) sogenannte RaumPlus-Potential-Flächen zur Verfügung gestellt, die mittels statistisch festgelegter prozentualer Nutzungsverteilung modelliert wurden (vgl. Kapitel 4.2). Eine Bewertung der stadtklimatischen Verträglichkeit der beabsichtigten Planung kann nur für die Flächen mit konkreten Planvorlagen, ab einer im Rahmen dieser Untersuchung relevanten Größe von mindestens 5000 m² abgegeben werden.

Die RaumPlus-Potentialflächen wurden mit dem „Mischpixel-Ansatz“ (vgl. Abbildung 30) modelliert, in dem die unterschiedlichen Nutzungen (Gebäude, Versiegelung, Freifläche, Baum etc.) je nach Flächenanteil nach zufälliger Verteilung in der Fläche verteilt wurde. Als Resultat stehen für diese Flächen die Mittelwerte der jeweiligen Klimaparameter, die zwar eine Handlungspriorität ableiten lassen, aber zum Beispiel kein konkret deutbares Kaltluftprozessgeschehen innerhalb des Gebietes selbst sowie in direkter Umgebung darstellen. Eine Beurteilung der stadtklimatischen Verträglichkeit ist in diesen Fällen somit nicht vertretbar. Besonderes Augenmerk sollte jedoch auf diejenigen Flächen gelegt werden, die in der Ist-Situation Teil einer Kaltluftleitbahn oder eines bedeutenden Kaltluftabflussgebietes sind. Hier sind die Symbole der Kaltluftleitbahn bzw. des Kaltluftzuflusses violett eingefärbt. Um die Funktion als Kaltluftlieferant oder Kaltlufttransportgebiet im bebauten Zustand möglichst gering einzuschränken, ist dringend empfohlen, die weitere Entwicklung fachlich begleiten zu lassen.

Die Bewertung der stadtklimatischen Verträglichkeit der mit konkreter Planvorgabe modellierten Entwicklungsflächen > 5000 m² wird in der Planungshinweiskarte mit verschiedenfarbigen Sternsymbolen angezeigt. Sie basiert einerseits auf der bewerteten Handlungspriorität der wie zukünftig geplant bebauten Fläche, andererseits auf dem Vergleich der bioklimatischen Situation zwischen Ist-Situation und Zukunftsszenario. In der folgenden Grafik (Abbildung 44) wird die Bewertungsmethode schematisch dargestellt. Für Entwicklungsflächen, die in der Basisgeometrie in mehrere Flächen unterteilt sind, geschieht die Bewertung dabei jeweils als gutachterliche Abwägung zwischen den einzelnen Teilbereichen. Je mehr sich die bioklimatische Situation der jeweiligen Fläche im Zukunftsszenario (das heißt mit der geplanten Bebauung) verschlechtert, desto kritischer ist die stadtklimatische Verträglichkeit zu bewerten. Wenn Flächen des Ausgleichsraums (Grün- und Freiflächen) im Zukunftsszenario überbaut werden, so ist die bioklimatische Bedeutung der Grünfläche in der Ist-Situation mit ausschlaggebend dafür, wie kritisch die Planung bewertet wird. Flächen, die in der Ist-Situation einem bedeutenden Kaltluftabfluss oder einer Kaltluftleitbahn angehören und in den Zukunftsszenarien überbaut werden, belegen dabei mindestens Stufe 2b, bei hoher Handlungspriorität Stufe 3. Die konkreten Beurteilungen der jeweiligen Bewertungsstufen und die Planhinweise dazu sind der **Tabelle 23** zu entnehmen.

Einige Flächen zeigen mit veränderter Nutzung im Zukunftsszenario eine (trotz der Temperaturzunahme) nur sehr geringfügige Verschlechterung oder sogar Verbesserung der bioklimatischen Situation und werden mit Stufe 0 bewertet. Dies sind entsiegelte Flächen oder solche, die von bebauter Fläche oder Brachfläche in eine Grünfläche umgewandelt werden.

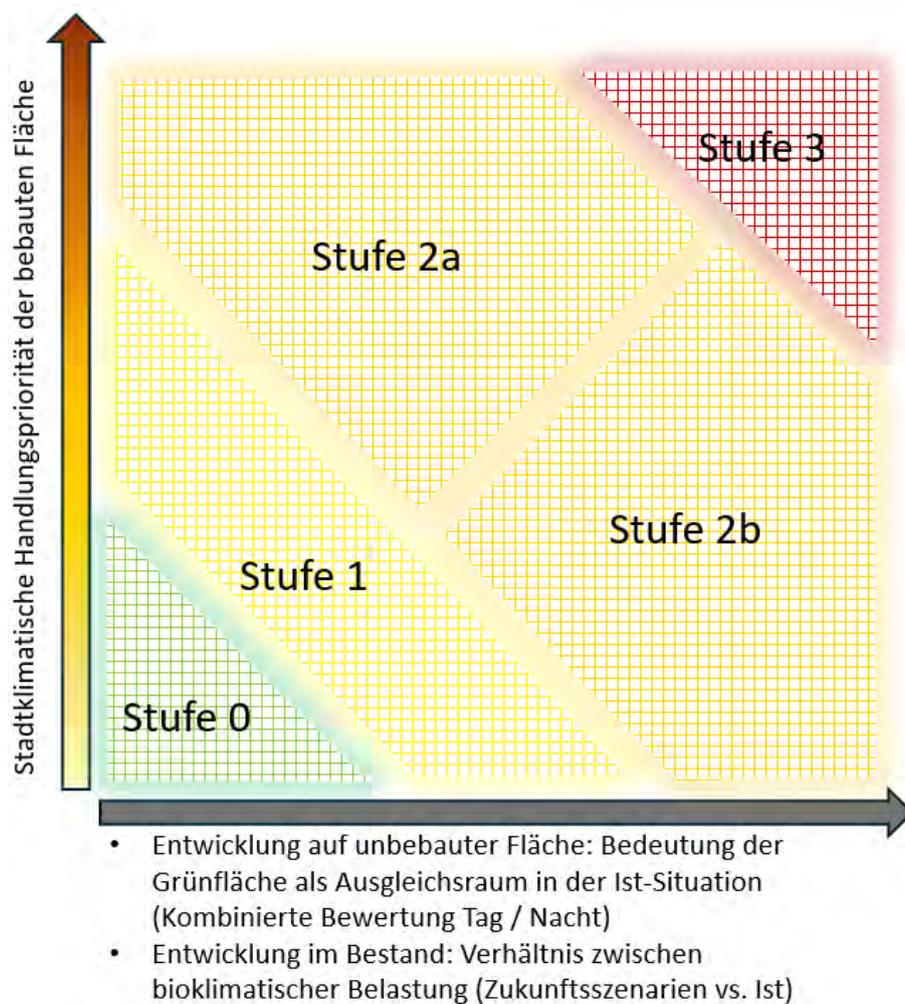


Abbildung 44: Schematische Darstellung der Bewertung der städtebaulichen Entwicklungsflächen

Tabelle 23: Abgestufte Bewertung der stadtklimatischen Verträglichkeit der städtebaulichen Erweiterungsflächen

Bewertung der stadtklimatischen Verträglichkeit		
	Stufe 0	Die vorgesehene Entwicklung führt zu einer Verbesserung der bioklimatischen Situation. Klimaökologische Standards sollten weiterhin beachtet werden.
	Stufe 1	Die vorgesehene Entwicklung ist unter Beachtung klimaökologischer Standards stadtklimaverträglich möglich
	Stufe 2a	Die vorgesehene Entwicklung ist mit optimierenden stadtklimatischen Maßnahmen möglich, eine klimafachliche Begleitung auf Basis der Ergebnisse der Stadtklimaanalyse wird empfohlen.
	Stufe 2b	
	Stufe 3	Es besteht die Gefahr der Entstehung eines neuen thermischen Belastungsschwerpunktes. Eine bioklimatische Aufwertung der Planung ist erforderlich, klimafachliche Begleitung auf Basis der Ergebnisse der Stadtklimaanalyse wird empfohlen.



6.5 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM

Das Stadtklimamanagementsystem ist die digitale Version der Stadtklimaanalyse. Es beinhaltet sämtliche Produkte inkl. deren (Meta)Daten und steht der Verwaltung in Form von gelayouteten GIS-Projekten (ArcGIS Pro) zur Verfügung.

Das Stadtklimamanagementsystem bietet gegenüber den reinen Kartendarstellungen (als Plot, PDF oder Bild-datei) einige Vorteile:

- Die komplexen flächenbezogenen Informationen können über einige Mausklicks direkt abgerufen werden.
- Die Informationen können mit weiteren Daten (z.B. neuen Entwicklungsvorhaben) überlagert und über Geodatenverarbeitungsprozesse miteinander verknüpft werden.
- Einige Informationen können bei Verfügbarkeit von Aktualisierungen direkt ersetzt werden (z.B. sozio-demographischen Daten).

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte, welche als GIS-Projekt vorliegt. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf dem vektorbasierten Datensatz (shapefile), in dem alle relevanten Informationen zu jeder der über 18.000 Teilflächen enthalten sind.

Insgesamt umfasst die shape-Datei der Bewertungsflächen ca. 50 Einzelinformationen zu den Kategorien Nutzung, Ergebnisse der Modellrechnungen, Bewertungsstufen Tag/ Nacht, für alle Szenarien, Bewertungen der Planungshinweiskarte und sonstige Sachdaten. Zusätzlich zu dieser Bewertungsflächen-Geometrie sind die Modellergebnisse jeweils als rasterbasiertes *.tif verfügbar.

Sämtliche Kartenwerke sind jeweils als GIS-Projekt (ArcGIS Pro) aufbereitet:

- Rasterbasierte Modellergebnisse
- Klimaanalysekarten
- Planungshinweiskarte

Zusätzlich zum oben beschriebenen Shape-File gehören folgende Geodaten im Vektorformat (*.shp) bzw. Rasterformat (*.tif) zum Gesamt-Datenpaket der Stadtklimaanalyse:

Vektorformat (Shape, *.shp)

- Gebäude
- Höhenlinien
- Kaltluftentstehungsgebiete
- Stadtgrenze
- Bedeutende Kaltluftabflüsse
- Städtebauliche Entwicklungsflächen – Gewerbegebiet

Rasterformat (*.tif, 5 m Auflösung)

- Eingangsdaten: Nutzung



- Eingangsdaten: Strukturhöhe
- Eingangsdaten: Digitales Geländemodell
- Modellergebnisse, jeweils für Ist-Situation sowie beide Zukunftsszenarien
 - PET um 14 Uhr in 1,1 m Höhe [°C]
 - Temperatur um 4 Uhr in 2 m Höhe [°C], sowie als Ausschnitt für das Siedlungsgebiet, für die Klimaanalysekarten
 - Kaltluftvolumenstromdichte um 4 Uhr [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$]
 - Kaltluftproduktionsrate [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{Stunde}$]
 - Strömungsgeschwindigkeit um 4 Uhr [m/s]
 - Multibandraster mit Strömungsrichtungen in verschiedenen Auflösungen



7. Maßnahmenkatalog Stadtklima

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche auf, in denen Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. Der nachstehende Maßnahmenkatalog zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung auf und soll dazu dienen, die Planungshinweise zu konkretisieren. Für die Region Pro Sud wurde ein Katalog aus 20 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert. Die Maßnahmen sind stickpunktartig in Tabelle 24 beschrieben.

- Thermisches Wohlbefinden im Außenraum
- Verbesserung der nächtlichen Durchlüftung
- Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum

Der Maßnahmenkatalog soll dazu dienen, bioklimatisch günstige Strukturen zu erhalten und bioklimatische belastende Strukturen zu optimieren. Er stützt sich allein auf bioklimatische Aspekte und ist mit anderen (z.B. ökologischen oder stadtplanerischen) Belangen abzuwägen.

Soweit möglich sollte der Grünanteil im städtischen Raum erhöht werden, insbesondere in thermisch belasteten Bereichen (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können (ab einer gewissen Größe) als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung oder die Erhöhung der Biodiversität und haben Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen).

Neben ihres Potentials zur Verringerung der thermischen Belastung am Tag und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen **Bäume** (und Sträucher) im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an. Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden. Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen⁸. Großkronige Laubbäume sind Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Ein-

⁸ z.B. haben Eichen, Weiden und Pappeln hohe Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen; besser geeignet sind daher u.a. Ahornarten und Eschen



strahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden.

Maßnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tag. Beschattete Straßen, Fuß- und Radwege oder Parkplätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M06: Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien). Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden.

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Maßnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeintrag minimiert wird (→ M20: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Krankenhäuser oder Pflegeheime. Durch eine geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflektion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, Verschattungselemente⁹ oder energetische Sanierung¹⁰ sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M15, M16, M17, M18).

Bei **Nachverdichtung** in Siedlungsgebieten sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insb. die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte *doppelte Innenentwicklung* in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz.

⁹ Bäume, Vordächer, Markisen, Jalousien/Außenrollos, Sonnensegel, Sonnenschutzglas, etc.

¹⁰ Wirkt nicht nur Energieverlusten im Winter entgegen, sondern auch gegen übermäßiges Aufheizen der Fassaden im Sommer.



Tabelle 24: Empfehlungen raumeinheitenspezifischer stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für Luxemburg (Maßnahmenkatalog) (Recommandations pour des mesures spécifiques à l'unité spatiale et efficaces pour le climat urbain au Luxembourg (catalogue de mesures))

Nr.	Maßnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUßENRAUM				
M01	Innen-/Hinterhofbegrünung	<ul style="list-style-type: none"> Vegetation und Entsiegelung 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	Innen- und Hinterhöfe
M02	Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen	<ul style="list-style-type: none"> Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Vernetzung von Grünflächen Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)
M03	Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten	<p>8. Helle Farben (insbesondere von Dächern) und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern</p>	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 	Dächer (Neubau und Bestand), ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze
M04	Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	<ul style="list-style-type: none"> Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und insb. nachts Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe
M05	Blaugrüne Verkehrsraumgestaltung	<ul style="list-style-type: none"> Blaue oder grüne Maßnahmen für den Verkehrsraum (blau-grün muss nicht zwangsläufig in Kombination erfolgen) Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.) sowie Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen) 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber (bei Pflanzung neuer Bäume) und nachts Synergien zum Niederschlagswassermanagement (Entlastung des Kanalnetzes bei Starkregen, Grundwasserneubildung, Verdunstungskühlleistung) und zur Biodiversität 	Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Nr.	Maßnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
M06	Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien	9. Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel)	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber und nachts 	Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld
M07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	<ul style="list-style-type: none"> Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen) 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Synergien zur Biodiversität 	Grün- und Freiflächen, Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze
M08	Erhalt und Verbesserung der Kaltluftproduktion	<ul style="list-style-type: none"> Schutz von Kaltluftentstehungsgebieten und Aufwertung von Flächen mit geringerer Kaltluftproduktion Verbesserung des Bodenaufbaus (Bodenlockerung, Bodenauftrag, usw.), Bodenschutz, Etablierung von verdunstungsstarken Pflanzen, Bewässerungsmaßnahmen, Begrünung und Entsiegelung 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insbesondere nachts, aber auch tagsüber Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	Grün- und Freiflächen
M09	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	<ul style="list-style-type: none"> Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe rechts) 	<ul style="list-style-type: none"> Bedeutung für den Kaltlufthaushalt Wichtige Funktionen für die Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement 	Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)
M10	Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen	<ul style="list-style-type: none"> Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird 	<ul style="list-style-type: none"> Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) Oberflächennahe Temperatur kann nachts über der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken 	Gewässer, Grün- und Freiflächen



Nr.	Maßnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
VERBESSERUNG DER NÄCHTLICHEN DURCHLÜFTUNG				
M11	Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten	10. Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung)	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung Reduktion des Wärmestaus 	Neubau, Gebäudekomplexe
M12	Entdichtung (Rückbau)	1. Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts Verbesserung der Durchlüftung Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen sowie Garagen, Lagerhallen, ggf. Industrie- und Gewerbebrachen, Bahnanlagen
M13	Vermeidung von Austauschbarrieren	2. Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen	<ul style="list-style-type: none"> Schutz des Luftaustauschsystems 	Grün- und Freiflächen, gut durchlüftete Wohn- und Gewerbeflächen, Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze
M14	Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen	<p>3. Freihaltung großräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen wie Wiesen, extensives Grünland, Felder, Kleingärten und Parklandschaften, die Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben</p> <p>1. Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft</p>	<ul style="list-style-type: none"> Schutz vor stärkerer Überwärmung und Verschlechterung der Durchlüftung Synergien zur Biodiversität 	Grün- und Freiflächen



Nr.	Maßnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM				
M15	Dachbegrünung	2. Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas Bei großflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas möglich Synergien zum Niederschlagswassermanagement, Biodiversität und Klimaschutz 	Flachdächer, ggf. flach geneigte Dächer
M16	Fassadenbegrünung	3. Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas Synergien zur Luftreinhaltung und Biodiversität sowie zum Lärm- und Gebäudeschutz 	Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)
M17	Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen	4. Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie	<ul style="list-style-type: none"> Wirkung tagsüber und nachts Verbesserung des Innenraumklimas Synergien zum Klimaschutz 	Gebäude (Neubau und Bestand)
M18	Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen	5. Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung	<ul style="list-style-type: none"> In erster Linie Klimaschutzmaßnahme Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber 	Gebäude (Bestand)
M19	Technische Gebäudekühlung	<ul style="list-style-type: none"> Möglichst ressourcenschonende Lösung; Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird Erdkältenutzung Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden 	<ul style="list-style-type: none"> Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung 	Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können
M20	Anpassung des Raumnutzungskonzeptes	1. Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume möglichst nicht nach Süden /zur warmen Straße ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer)	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen) 	Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (vorwiegend Neubau)



10.1 HINWEISE ZUR WIRKSAMKEIT VON MAßNAHMEN

Zu den weitestgehend gesicherten Erkenntnissen gehört zu allererst die Feststellung, dass sich mit vielen der bekannten Maßnahmen (vertikale Gebäudebegrünungen, Albedoerhöhungen, Entsiegelungen, Stadtbäume) positive Effekte für den thermischen Komfort erzielen lassen. Abbildung 45 verdeutlicht an einem Fallbeispiel aus dem Stadtentwicklungsplan Klima Berlin (SenSW 2010), dass sich die stärksten Wirkungen durch die kleinräumige Kombination von Maßnahmen ergeben. Der Grundsatz „das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ scheint auch hier zu gelten. Die Abbildung verdeutlicht aber auch eine weitere Erkenntnis, die mit hinreichender Sicherheit übertragbar sein dürfte. Die klassischen Maßnahmen weisen insbesondere tagsüber eine signifikante Wirksamkeit auf, während sie in den Nachstunden kaum zur Abkühlung beitragen (z.B. Albedoerhöhung) oder sogar zu einer weiteren Erwärmung der Umgebung (z.B. Wasserflächen, Stadtbäume) beitragen können (vgl. auch Stadt Zürich 2020).

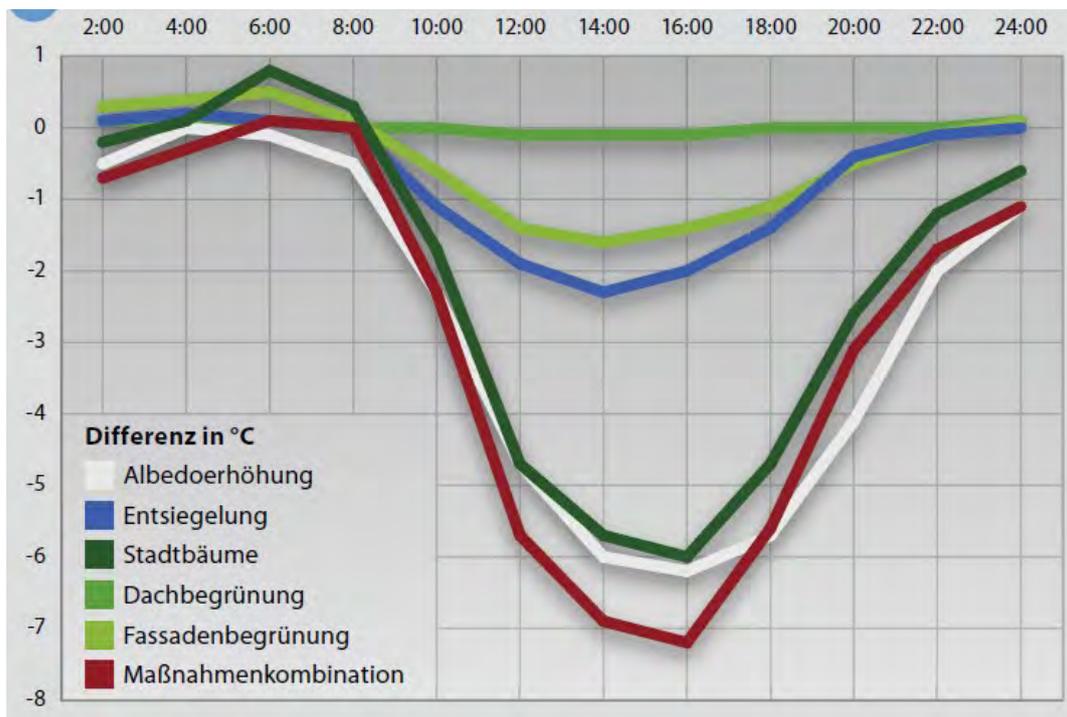


Abbildung 45: Veränderungen durch Anpassungsmaßnahmen am Beispiel eines Tagesverlaufs der Außentemperatur in zwei Metern Höhe (Changements dus aux mesures d'adaptation en utilisant l'exemple d'une variation diurne de la température extérieure à une hauteur de deux mètres)

Da die nächtliche Abkühlung durch Maßnahmen im Außenraum¹¹ nur bedingt möglich zu sein scheint (insbesondere aufgrund des Klimawandels sowie weiterer Verdichtung), kommt zwei Maßnahmenpaketen eine besondere Bedeutung zu: zum einen der Erhalt und die Verbesserung der nächtlichen Durchlüftung des Stadtkörpers, zum anderen Maßnahmen an den Gebäuden selbst einschließlich ihrer unmittelbaren Kühlung. Der baulich-technischen Gebäudekühlung haftet dabei stets der Ruf der Umweltschädlichkeit an. Allerdings existieren bereits heute nachhaltige Lösungen oder befinden sich in der fortgeschrittenen Entwicklungsphase, z.B. Kompressionskältemaschinen oder Ab- und Adsorptionskältemaschinen, adiabatische (Abluft-)Kühlung (UBA 2020). Auch die in der DIN 4108-2 zum sommerlichen Wärmeschutz subsummierten Maßnahmen (innovative Glastechniken, Außenjalousien, smarte Nachtlüftungssysteme) gehören in diesen hochwirksamen Maßnahmenkomplex.

¹¹ Bereich außerhalb von Gebäuden



Einen besonderen Hinweis bedarf die – insbesondere extensive, meist aber auch intensive – Dachbegrünung. Die Dachbegrünung hat vielfältige positive Effekte, zum Beispiel die Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum und Synergien zum Niederschlagswassermanagement, zur Biodiversität und zum Klimaschutz und wurde daher als Maßnahme M15 auch in den Maßnahmenkatalog aufgenommen. Im Hinblick auf den thermischen Komfort im Außenraum (im Aufenthaltsbereich des Menschen, bis 2 m. ü. Gr.) existiert allerdings keine Untersuchung, die eine entsprechende Wirkung nachweisen konnte. Die Maßnahme ist schlichtweg zu weit entfernt vom zu betrachtenden Bodenniveau. Eine australische Studie (Coutts et al. 2014) empfiehlt daher, die blau-grünen Maßnahmen auf das Straßenniveau zu konzentrieren und die Dächer mit einer hohen Albedo zu versehen (vgl. Abbildung 46). Es sei hinzugefügt, dass auch hier mit flachen Gebäude <5m (z.B. Garagenhöfe, Bungalows) Ausnahmen existieren, von deren intensiven Gründächern in bestimmten Konstellationen auch eine positive Wirkung für den thermischen Komfort im Außenraum ausgehen kann (vgl. KURAS 2017).

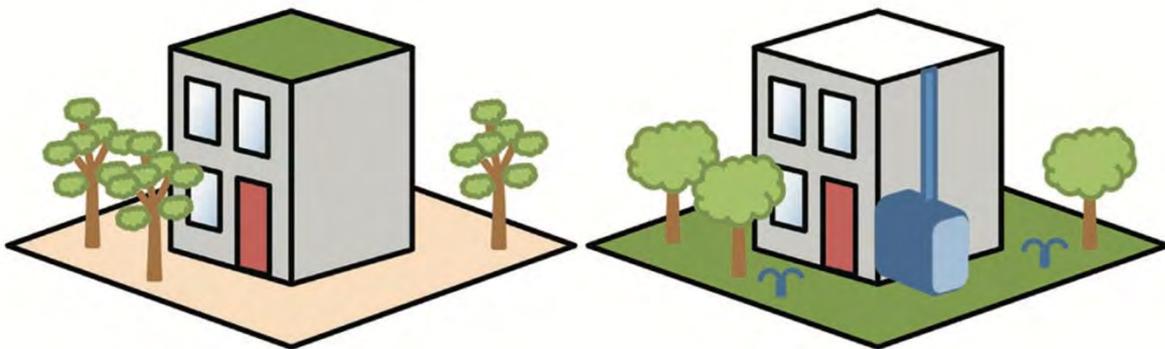


Figure 14: Human thermal comfort can be maximised by providing water at street level, rather than retaining on the rooftop

Abbildung 46: Blau-grüne Straßenraumgestaltung ist bioklimatisch wirksamer als Dachbegrünung (Coutts et al. 2014) (*L'aménagement bleu-vert de l'espace routier est plus efficace sur le plan bioclimatique que les toits végétalisés (Coutts et al. 2014)*)



Quellenverzeichnis

- An der Heiden, M.; Muthers, S.; Niemann, H.; Buchholz, U.; Grabenhenrich, L.; Matzarakis, A. (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. In: Bundesgesundheitsblatt 62, Heft 5, S. 571-579.
- BBSR (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte.
- Beckmann S., Hiete M., Beck C. (2021): Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments — Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. Climate Risk Management, Volume 32. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286> (letzter Abruf Mai 2024)
- BFN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BFN-Skripten 444.
- BMVI (2016): Handlungshilfe Klimawandelgerechter Regionalplan. Ergebnisse des Forschungsprojektes KlimREG für die Praxis: Schriftenreihe: MORO-Praxis. BMVI.
- Bundesregierung (2004): Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Business Wissen (2023): Grundlagen und Vorgehensweise bei der Szenario-Technik. Online: <https://www.business-wissen.de/hb/grundlagen-und-vorgehensweise-bei-der-szenario-technik> (letzter Abruf Mai 2024).
- Coutts, A., M. Loughnan, N. Tapper, E. White, J. Thom, A. Broadbent and R. Harris (2014): Impacts of water sensitive urban design solutions on human thermal comfort. Green Cities and Microclimate - B3.1 -2-2014.
- DGNB (2020): DGNB System – Kriterienkatalog Quartiere VERSION2020. Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen.
- DKRZ - Deutsche Klimarechenzentrum (2023): Die SSP-Szenarien. Online: <https://www.dkrz.de/de/kommunikation/klimasimulationen/cmip6-de/die-ssp-szenarien> (letzter Abruf Mai 2024)
- DWD (2014): MUKLIMO_3 Modell.
- DWD (2020): Nationaler Klimareport, Klima – gestern, heute und in der Zukunft.
- DWD (2023a): Wetter- und Klimalexikon. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html. (letzter Abruf Mai 2024)
- DWD (2023b): Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadt/pl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html. (letzter Abruf Mai 2024)
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2024): Climate Data Center (CDC). Beobachtungs- und Rasterdaten. Online: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC.
- Fanger, P.O. (1972): Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering. New York: McGraw Hill.
- Flohn, H. (1954): Witterung und Klima in Mitteleuropa. 2. Auflage, Forschungen zur deutschen Landes-kunde, 78 S., Hinzl Verlag Stuttgart.
- Fürst, D. und Scholles, F. (Hg.) (2008): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. Dortmund: Dorothea Rohn, 3.Auflage.
- Gaede, M. und Härtling, J. (2010): Umweltbewertung und Umweltprüfung. Braunschweig: Westermann.
- GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2021): Klimaökologische Situation in Luxemburg. Hannover.
- Giorgi F., Jones C., Asrar G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regionale level: The CORDEX Framework, WMO BULLETIN, 58(3):175-183.
- Groß, G. (1987): Some effects of deforestation on nocturnal drainage flows and local climate – a numerical study. Boundary-Layer Meteorol. 38, 315-337.



- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research* (10): 483-498.
- Groß, G.; Frey, T.; Trute, P. (2002): Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände, *DEWI Magazin* Nr. 20.
- Groß, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 11, No. 5, 701-710 (October 2002)
DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0601.
- Groß, G. (2012a): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. *Micro-scale numerical experiments*, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 4, 399-412.
- Groß, G. (2012b): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 2, 173-181.
- Groß, G. (2013): On the parametrization of urban land use in mesoscale models, *Boundary-Layer Meteorol* (2014) 150:319-326.
- Groß G. (2016): Dispersion of traffic exhausts emitted from a stationary line source versus individual moving cars – a numerical comparison, *Meteorologische Zeitschrift*.
- Groß, G. (2017): Some effects of water bodies on the environment – numerical experiments, *Journal of Heat Island Institute International* Vol. 12-2.
- HLNUG (Hg.) (2022): Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse. Unter Mitarbeit von Infrastruktur & Umwelt, Professor Böhm und Partner. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf, zuletzt geprüft am 21.05.2024.
- Höppe, P.; H. Mayer: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19 (1987) 1, S. 22–29.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – In Vorbereitung*.
- ISO (1989). ISO 7243. Hot environments - Estimation of the heat stress on working man based in the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva, Switzerland, International Organisation for Standards.
- Jacob et al. (2016): Regionale Klimamodellierung. In: *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* S. 27-35. Cham: Springer-Verlag.
- Jendritzky, G.; Menz, G.; Schirmer, H.; Schmidt-Kessen, W. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). In: *Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung*, Bd. 114.
- Jendritzky (2007): The Universal Thermal Climate Index UTCI. http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007-12-Abstract_UTCI_Jendritzky.pdf
- Kaspar F., Müller-Westermeier G., Penda E., Mächel H., Zimmermann K., Kaiser-Weiss A., Deutschländer T. (2013): Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany’s National Climate Data Centre. *ADV. SCI. RES.*, 10, 99–106



- KURAS – Konzepte für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme (2017): KURAS-Leitfaden. Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung. <http://kuras-projekt.de/downloads/erzeugnisse-regenwasserbewirtschaftung/>
- Kuttler, W. (2013): *Klimatologie*. Paderborn: UTB, 2. Auflage.
- LBEG 2022: Geofakten 39: Dokumentation der niedersächsischen Klimaprojektionsdaten AR5-NI v2.1. Online: https://dx.doi.org/10.48476/geofakt_39_1_2022
- Laurent et al (2018): Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. In: *PLOS Medicine*.
- Linke C. et al. (2016): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam.
- Mayer, H.; Beckröge, W. ; Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.
- MeteoLux (2023): Angefragte Klimadaten für die Station Flughafen Findel. <https://www.meteolux.lu>
- MeteoLux (2023): Normal- und Extremwerte. Online: <https://www.meteolux.lu/de/klima/normal-und-extremwerte/?lang=de>
- Ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement durable & Ministère de l'Énergie et de l'Aménagement du territoire 2018-2023: LIS-L Land Cover, <https://data.public.lu/fr/datasets/landcover-landuse-2018/>
- Mosimann et al. (1998): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Bearbeitung der klima- und immissionsökologischen Inhalte im Landschaftsrahmenplan und Landschaftsplan. Schriftenreihe: Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie.
- Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A., Manning M. R., Rose S. K., van Vuuren D. P., Carter T. R., Emori S., Kai-numa M., Kram T., Meehl G. A., Mitchell J. F. B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S. J., Stouffer R. J., Thomson A. M., Weyant J. P., Wilbanks T. J. (2010): The next generation of scenarios for climate change re-search and assessment. *Nature* 463, 747–756.
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke (2017): *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Peters G.P., Andrew R.M., Boden T., Canadell J.G., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M.R., Wilson C. (2012): The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nat. Clim. Change* 3, 4–6.
- R Core Team (2019): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- REKLIES-DE (2017): REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN ENSEMBLE FÜR DEUTSCHLAND - NUTZERHANDBUCH.
- SANTHOLZ und SETT (2019): Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress. Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn. *UNU Workingpaper*.
- Schär, Ch., Ch. Frei, D. Lüthi, H.C. Davies (1996): Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophys. Res. Lett.* 23, 669-672.
- Sievers, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Berichte des DWD 227, Offenbach.
- Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- The COMET program (2017): Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. <https://satelliteliaisonblog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- The International Civil Aviation Organization (ICAO) Standard Atmosphere (1957). *Nature* 179, 299–300. <https://doi.org/10.1038/179299a0>



Thiemeßl M.J., Gobiet A., Leuprecht A. (2011): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. Int J Cli-matol 31(10):1530–1544.

UBA (2005): Gesünder Wohnen — Aber wie? Praktische Tipps für den Alltag. Umweltbundesamt.

UBA (2019a): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. UBA-Texte.

UBA (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze>

UBA – Umweltbundesamt (2022a): Trends der Lufttemperatur. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur#steigende-durchschnittstemperaturen-weltweit>

UBA – Umweltbundesamt (2022b): Trends der Niederschlagshöhe. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>

UBA – Umweltbundesamt (2022c): Indikator: Heiße Tage. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-heisse-tage#die-wichtigsten-fakten>

Urban H. & Steininger K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger K., König M., Bednar-Friedl B., Loibl W., Kranzl L., Prettenhaler F., Haas W., Formayer H., Goetzl M., Zulka K. 2015:Economic Evaluation of Climate Change Impacts – Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria. Basel: 301–322.

VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787, Bl.5: Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.

VDI (2004) VDI-Richtlinie 3787, Bl.9: Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen.

VDI (2008) VDI-Richtlinie 3785, Bl.1: Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.

VDI (2008a) VDI-Richtlinie 3785, Bl.2: Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima.

VDI (2015): VDI-Richtlinie 3787, Bl.1: Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.

VDI (2017): VDI-richtlinie 3783, Bl.7: Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder.

VDI (2020): VDI-Richtlinie 3787, Bl.4: Umweltmeteorologie. Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung.

VDI (2020a): VDI-Richtlinie 3787, Bl.8: Umweltmeteorologie. Stadtentwicklung im Klimawandel.

VDI (2022) VDI-Richtlinie 3787, Bl.2: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas



GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 20.06.2024

Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST)
Belvaux, 28/06/2024

Erstellt von:

Elke Hipler (Diplom Geographie)

Ulrike Vogelsberg (Diplom Meteorologie)

Nadja Krause (M.Sc. Geoinformationstechnologien)

Dr. Jürgen JUNK (Grup leaderLIST)

Gepüft von:

Dr. Cornelia Burmeister (Diplom Geographie)

Dr. Jürgen JUNK (Grup leaderLIST)

Die Erstellung der Klimaexpertise erfolgte entsprechend dem Stand der Technik nach bestem Wissen und Gewissen. Die Klimaexpertise bleibt bis zur Abnahme und Bezahlung alleiniges Eigentum des Auftragnehmers. Eigentum und Nutzungsrecht liegen bei den Auftraggebern.



Anhang

Liste der im Rahmen der Stadtklimaanalyse erstellten Karten (*jpg / *png, 300 dpi, Format DIN A0)

- **Modellergebnisse**
 - Karte Modellergebnis PET 14 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis PET 14 Uhr Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis PET 14 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Strömungsgeschwindigkeit 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Strömungsgeschwindigkeit 4 Uhr Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Strömungsgeschwindigkeit 4 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom 4 Uhr Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom 4 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Kaltluftproduktion 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Kaltluftproduktion 4 Uhr Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Kaltluftproduktion 4 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
- **Klimaanalysekarten**
 - Klimaanalysekarte Ist-Situation
 - Klimaanalysekarte Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Klimaanalysekarte Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
- **Planungshinweiskarte**



Tabelle A 1: Für das verwendete Modellensemble verfügbare Ensemblemitglieder (Modellkombinationen) und Szenarien (Historical, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5). GCM bzw. RCM = Globales bzw. Regionales Klimamodell (Global / Regional Climate Model).

	GCM	RCM	Historical	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
1	CanESM2	CCLM	✓	✗	✗	✓
2	EC-EARTH	CCLM	✓	✓	✓	✓
3	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
4	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✗	✓	✓
5	EC-EARTH	RCA4	✓	✓	✓	✓
6	IPSL-CM5A	RCA4	✓	✗	✓	✓
7	MIROC5	CCLM	✓	✓	✗	✗
8	MIROC5	REMO2015	✓	✗	✗	✓
9	HadGEM2-ES	WETTREG2013	✓	✗	✗	✓
10	HadGEM2-ES	CCLM	✓	✗	✓	✓
11	HadGEM2-ES	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
12	HadGEM2-ES	STARS3	✓	✓	✗	✗
13	HadGEM2-ES	RCA4	✓	✓	✓	✓
14	MPI-ESM	WETTREG2013	✓	✓	✗	✗
15	MPI-ESM	CCLM	✓	✗	✓	✓
16	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
17	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
18	MPI-ESM	STARS3	✓	✓	✗	✗
19	MPI-ESM	RCA4	✓	✓	✓	✓

Tabelle A 2: Bewertung der statistischen Signifikanz anhand des Trend-/Rauschverhältnisses.

Trend- / Rauschverhältnis	Bewertung
≥ 2,0	sehr stark zunehmend
≥ 1,5 und < 2,0	stark zunehmend
≥ 1,0 und < 1,5	schwach zunehmend
< 1,0 und > -1,0	kein Trend
≤ -1,0 und > -1,5	schwach abnehmend
≤ -1,5 und > -2,0	stark abnehmend
≤ -2,0	sehr stark abnehmend



Tabelle A 3: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2022).

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mäßige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwache Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mäßige Wärmebelastung
35 °C	Heiß	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

Folgende Institutionen waren regelmäßiges Mitglied der AG:

- Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) (Jürgen Junk)
- Region PRO-SÜD (Gaëlle Tavernier)
- Gemeinde Bettembourg
- Gemeinde Differdange
- Gemeinde Dudelange
- Gemeinde Esch-sur-Alzette
- Gemeinde Käerjeng
- Gemeinde Kayl
- Gemeinde Mondercange
- Gemeinde Pétange
- Gemeinde Rumelange
- Gemeinde Sanem
- Gemeinde Schifflange

Insgesamt fanden 3 Sitzungen der AG zu folgenden Themenschwerpunkten statt:

- Kick-Off-Meeting (Online-Termin) am 17.03.2023
- Workshop (Online-Termin) zu Modellergebnisse, Klimaanalysekarte und Eingangsdaten der Zukunftsrechnung am 09.10.2023
- Workshop (Online-Termin) zu Modellergebnissen der Zukunftsszenarien, und Ausblick auf Planungshinweiskarte am 24.04.2024

Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

Modellergebnisse Tagsituation (um 14 Uhr) Ist - Situation

PET in 1,1 m ü. Gr. [°C]

	<= 21,0	Keine Wärmebelastung
	> 21,0 - 23,0	
	> 23,0 - 25,0	
	> 25,0 - 27,0	Schwache Wärmebelastung
	> 27,0 - 29,0	
	> 29,0 - 31,0	
	> 31,0 - 33,0	Mäßige Wärmebelastung
	> 33,0 - 35,0	
	> 35,0 - 37,0	
	> 37,0 - 39,0	Starke Wärmebelastung
	> 39,0 - 41,0	
	> 41,0	Extreme Wärmebelastung

Sonstiges

	Gemeinden PRO-SUD
	Gebäude

Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)	Bodenfeuchte: 60 %
Projektleitung Elke Hipler	Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag	Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)
Interne Projektnummer 2_23_006	Starttemperatur 22,0 °C in 2 m ü. NHN	Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
Verwendetes Modell FITNAH-3D	Horizontale räumliche Auflösung 5 m	

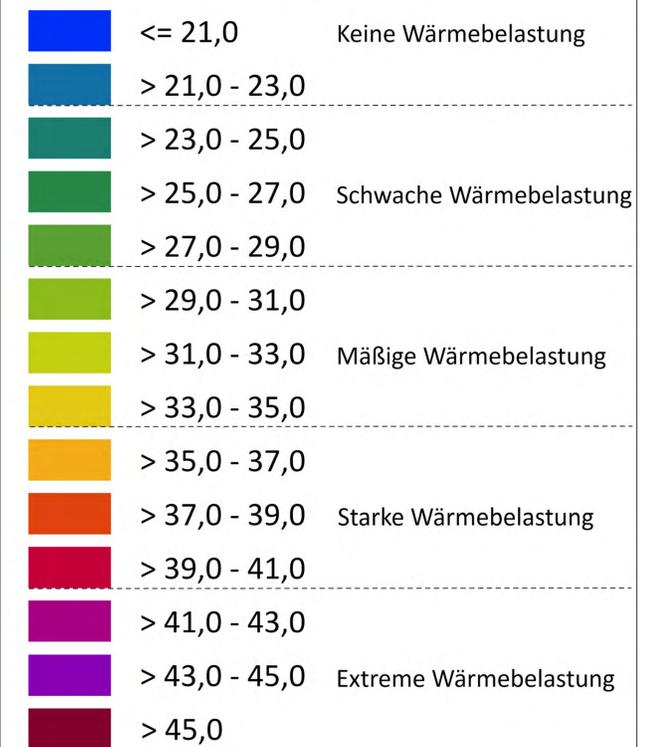
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxembourg TM (ESPG: 2169)



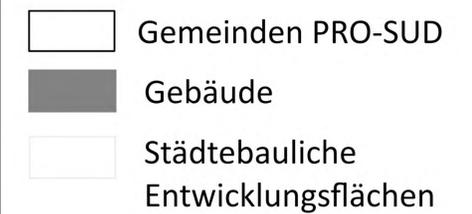
Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

Modellergebnisse Tagsituation (um 14 Uhr) Zukunftsszenario I

PET in 1,1 m ü. Gr. [°C]



Sonstiges



Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand) Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag	Bodenfeuchte: 60 % Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)
Projektleitung Elke Hipler	Starttemperatur 22,7 °C in 2 m ü. NHN	Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
Interne Projektnummer 2_23_006	Zukunftsszenario I (schwacher Klimawandel) Zeitspanne: 2031- 2060 RCP- Szenario: 4.5 Statistik: 25. Perzentil	
Verwendetes Modell FITNAH-3D		
Horizontale räumliche Auflösung 5 m		

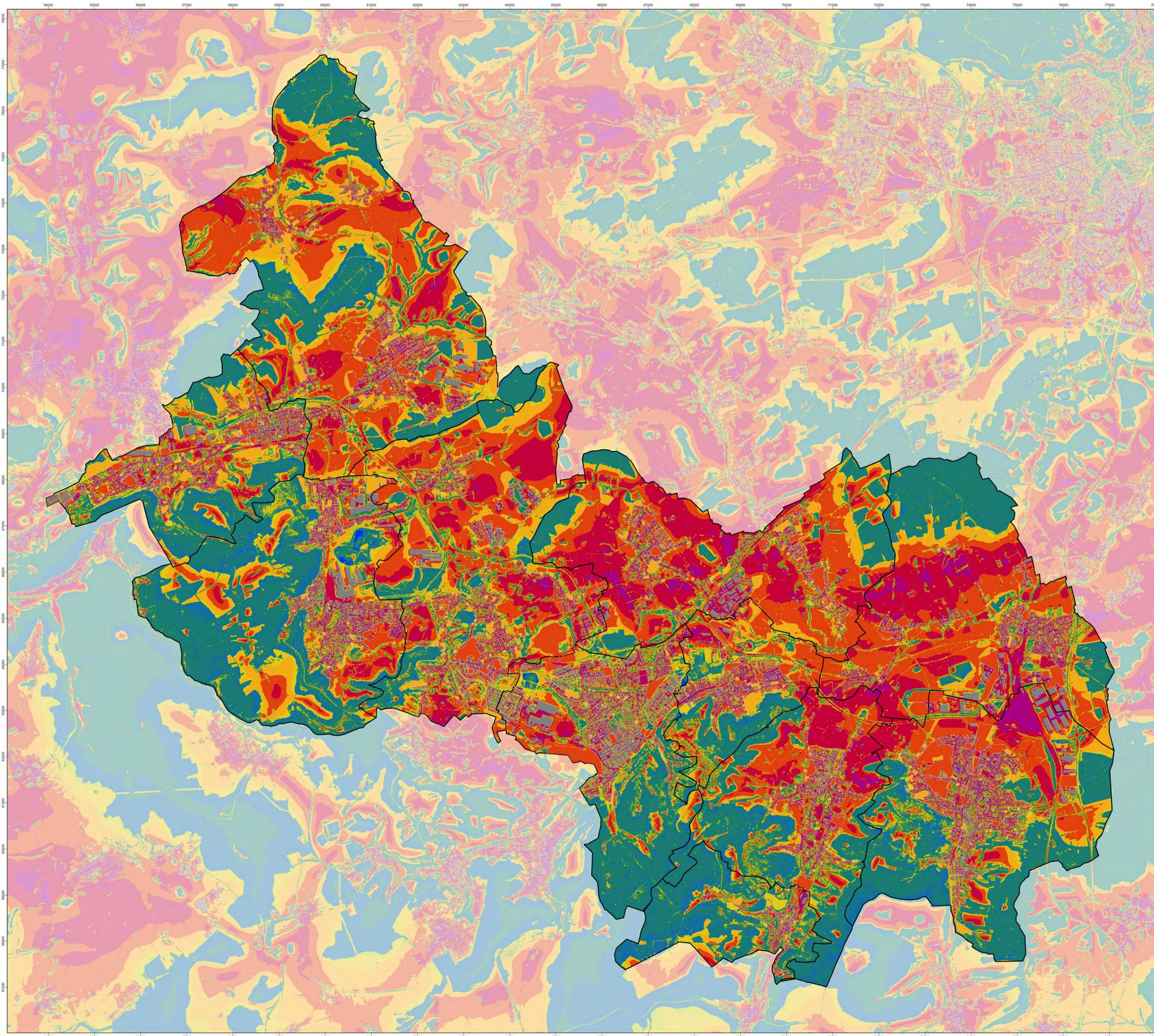
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxembourg TM (ESPG: 2169)



im Auftrag von: Region Pro-Süd Luxemburg



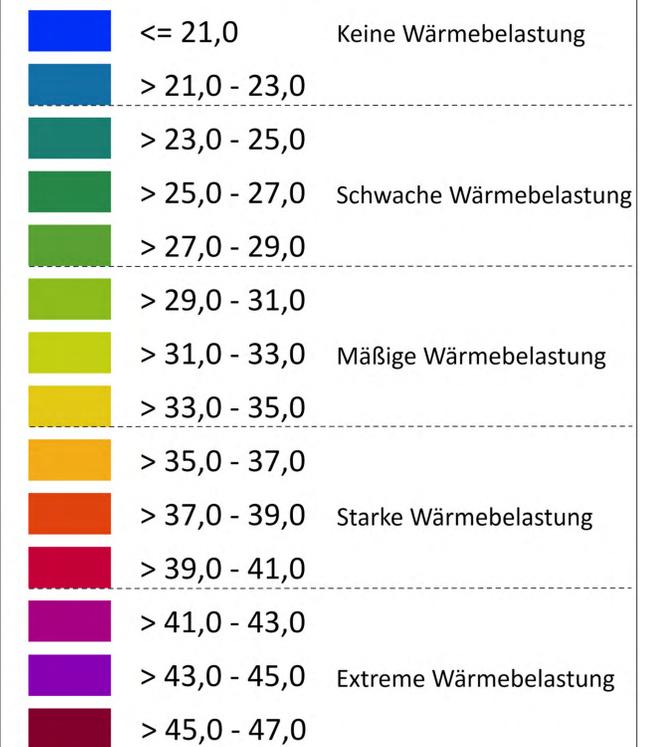
Syndicat PRO-SUD
6, Ellergronn
L-4114 Esch-sur-Alzette



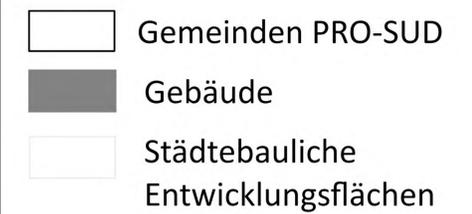
Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

Modellergebnisse Tagsituation Zukunftsszenario II

PET in 1,1 m ü. Gr. [°C]

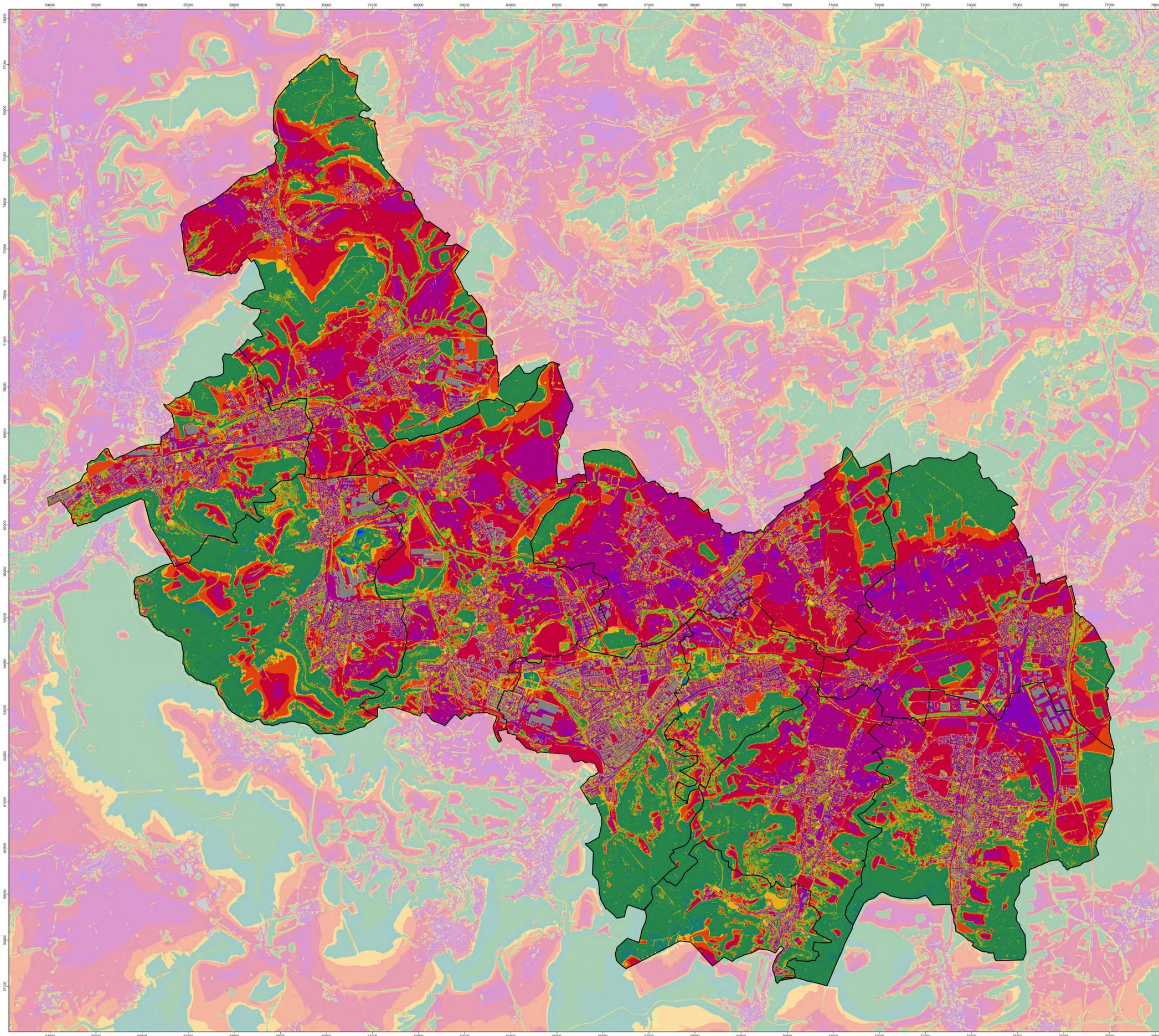


Sonstiges



Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand) Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag	Bodenfeuchte: 60 % Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)
Projektleitung Elke Hipler	Starttemperatur 24,7 °C in 2 m ü. NHN	Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
Interne Projektnummer 2_23_006	Zukunftsszenario II (starker Klimawandel) Zeitspanne: 2031- 2060 RCP- Szenario: 4.5 Statistik: 75. Perzentil	
Verwendetes Modell FITNAH-3D		
Horizontale räumliche Auflösung 5 m		

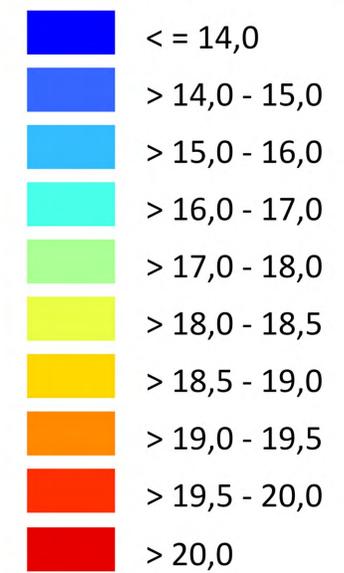
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxemburg TM (ESPG: 2169)



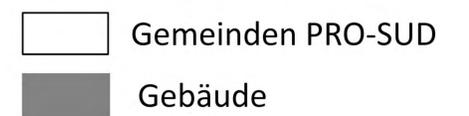
Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

Modellergebnisse Nachtsituation (um 4:00 Uhr) Ist - Situation

Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. [°C]



Sonstiges



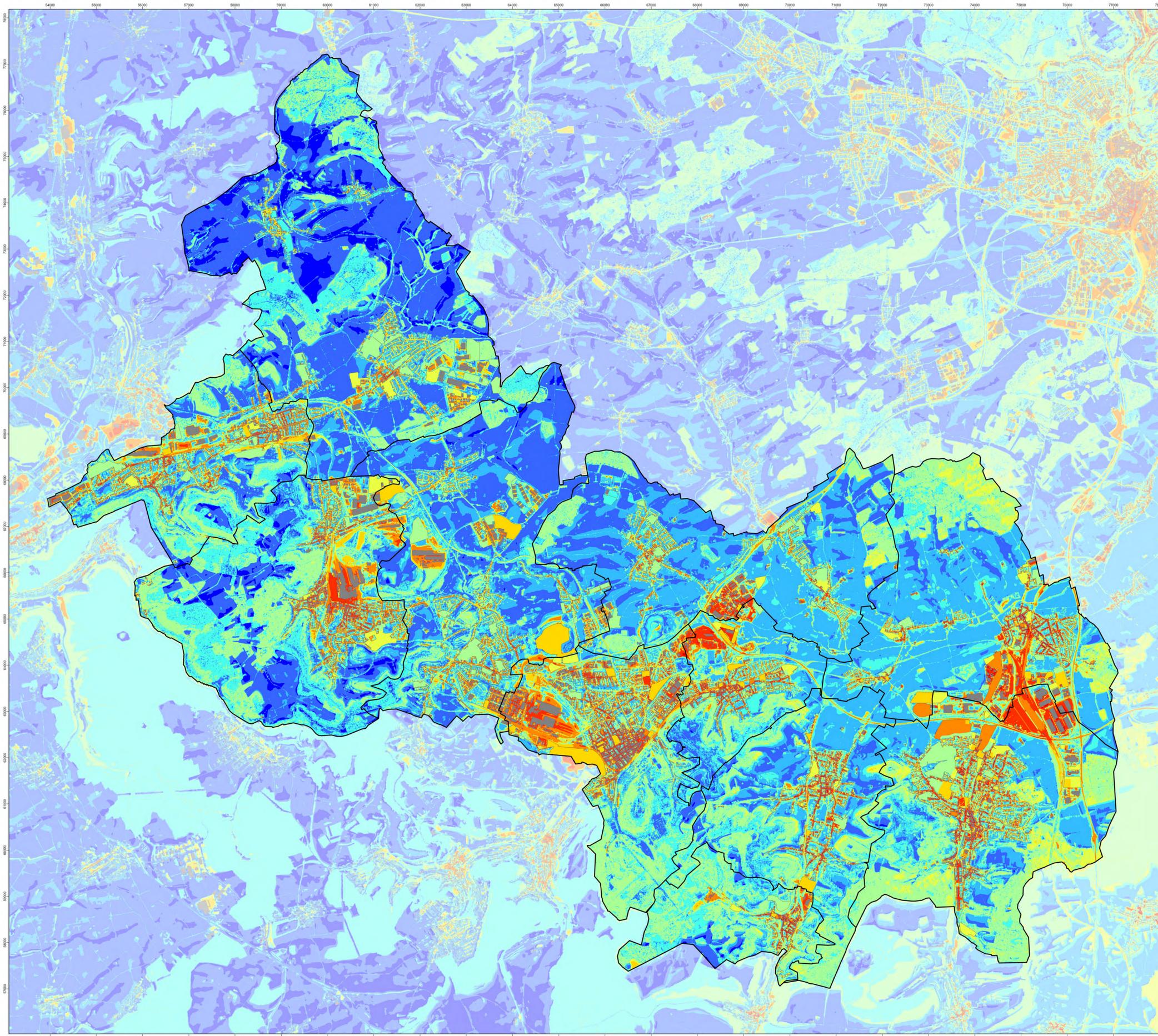
Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)	Bodenfeuchte: 60 %
Projektleitung Elke Hipler	Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag	Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)
Interne Projektnummer 2_23_006	Starttemperatur 22,0 °C in 2 m ü. NHN	Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
Verwendetes Modell FITNAH-3D	Horizontale räumliche Auflösung 5 m	

Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxembourg TM (ESPG: 2169)

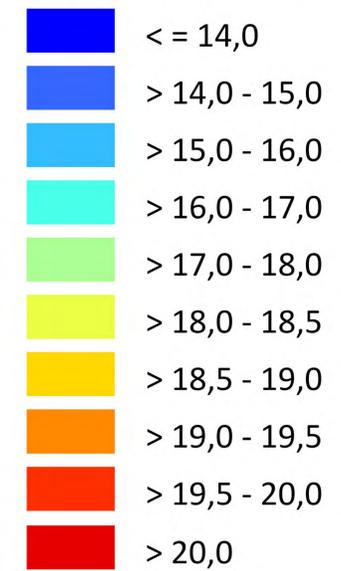


Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

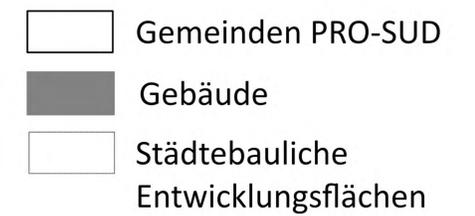
Modellergebnisse Nachtsituation (um 4:00 Uhr) Zukunftsszenario I



Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. [°C]



Sonstiges



Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster Projektleitung Elke Hipler Interne Projektnummer 2_23_006 Verwendetes Modell FITNAH-3D Horizontale räumliche Auflösung 5 m	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand) Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag Starttemperatur 22,7 °C in 2 m ü. NHN Zukunftsszenario I (schwacher Klimawandel) Zeitspanne: 2031- 2060 RCP- Szenario: 4.5 Statistik: 25. Perzentil	Bodenfeuchte: 60 % Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung) Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
---	--	--

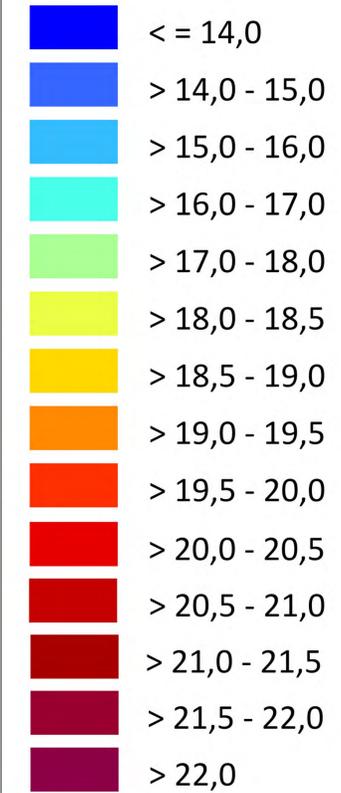
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxembourg TM (ESPG: 2169)



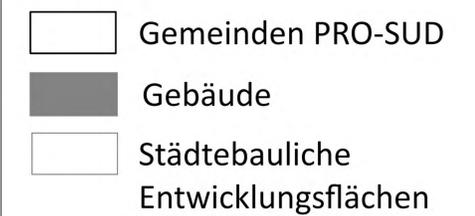
Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

**Modellergebnisse
Nachtsituation (um 4:00 Uhr)
Zukunftsszenario II**

Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. [°C]

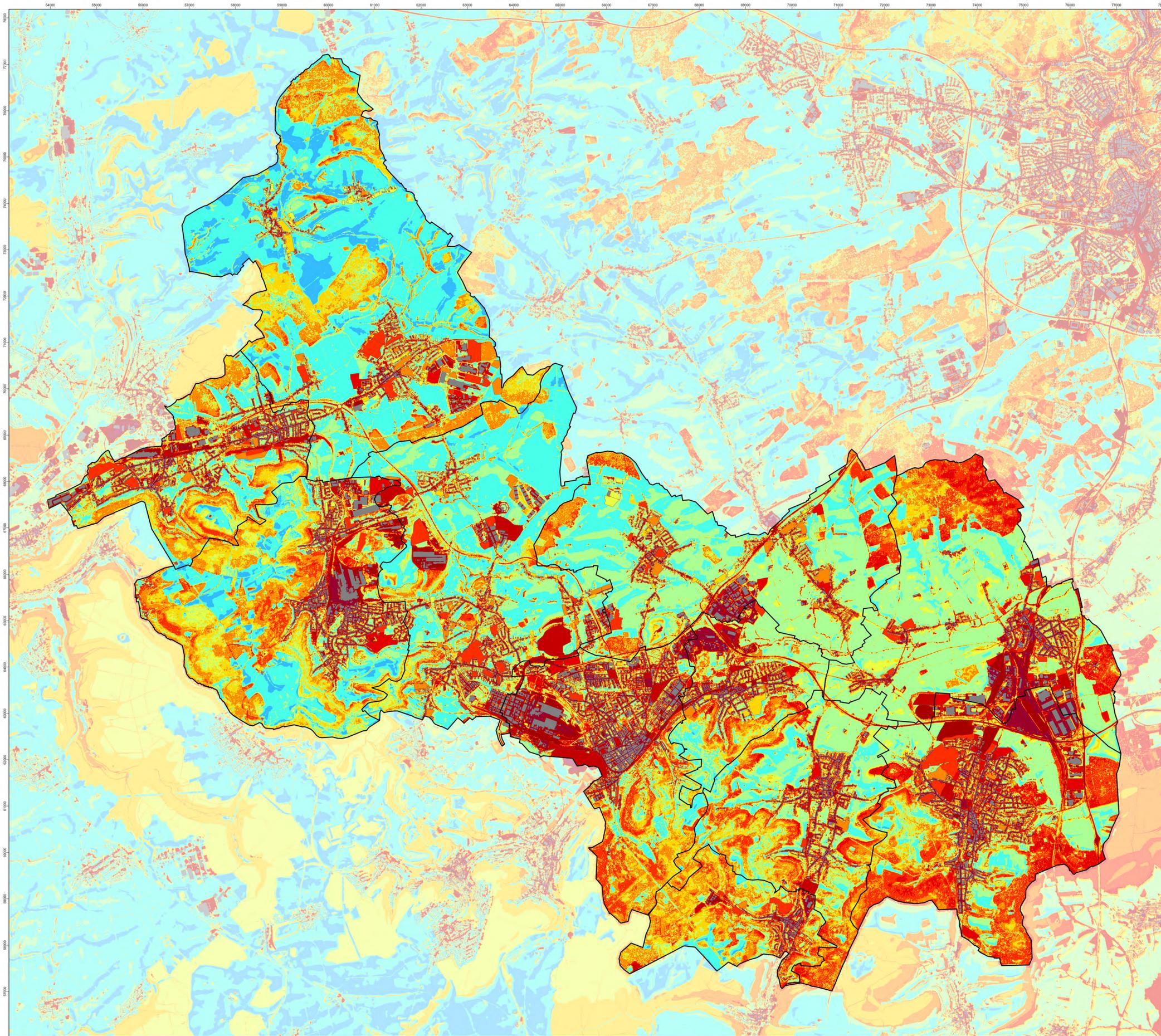


Sonstiges



<p>Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster</p> <p>Projektleitung Elke Hipler</p> <p>Interne Projektnummer 2_23_006</p> <p>Verwendetes Modell FITNAH-3D</p> <p>Horizontale räumliche Auflösung 5 m</p>	<p>Meteorologische Randbedingungen</p> <p>Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)</p> <p>Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag</p> <p>Starttemperatur 24,7 °C in 2 m ü. NHN</p> <p>Zukunftsszenario II (starker Klimawandel) Zeitspanne: 2031- 2060 RCP- Szenario: 4.5 Statistik: 75. Perzentil</p>	<p>Bodenfeuchte: 60 %</p> <p>Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)</p> <p>Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung</p>
--	---	--

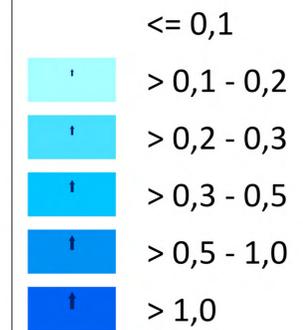
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF-Luxembourg TM (ESPG: 2169)



Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

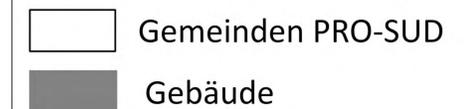
Modellergebnisse Nachtsituation (um 4:00 Uhr) Ist - Situation

Windgeschwindigkeit in 2 m ü. Gr. [m/s]



Windpfeile aggregiert in 200 m Auflösung

Sonstiges



Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)	Bodenfeuchte: 60 %
Projektleitung Elke Hipler	Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag	Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)
Interne Projektnummer 2_23_006	Starttemperatur 22,0 °C in 2 m ü. NHN	Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
Verwendetes Modell FITNAH-3D	Horizontale räumliche Auflösung 5 m	

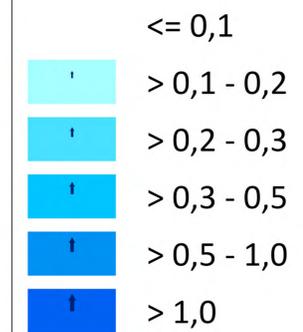
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxembourg TM (ESPG: 2169)



Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

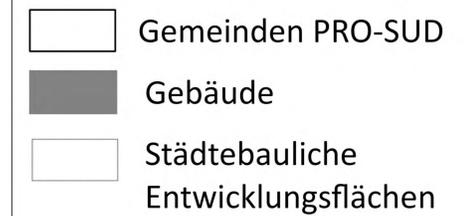
Modellergebnisse Nachtsituation (um 4:00 Uhr) Zukunftsszenario I

Windgeschwindigkeit in 2 m ü. Gr. [m/s]



Windpfeile aggregiert in 200 m Auflösung

Sonstiges



Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand) Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag	Bodenfeuchte: 60 % Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)
Projektleitung Elke Hipler	Starttemperatur 22,7 °C in 2 m ü. NHN	Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
Interne Projektnummer 2_23_006	Zukunftsszenario I (schwacher Klimawandel) Zeitspanne: 2031-2060 RCP- Szenario: 4.5 Statistik: 25. Perzentil	
Verwendetes Modell FITNAH-3D	Horizontale räumliche Auflösung 5 m	

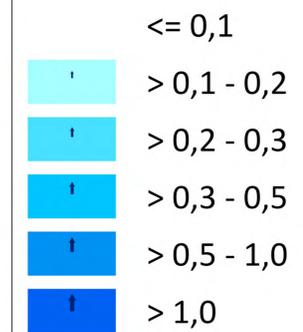
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxembourg TM (ESPG: 2169)



Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

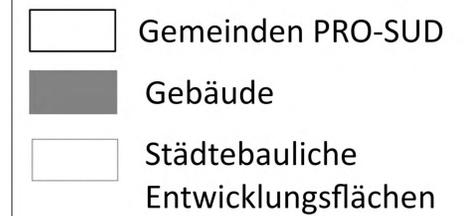
Modellergebnisse Nachtsituation (um 4:00 Uhr) Zukunftsszenario II

Windgeschwindigkeit in 2 m ü. Gr. [m/s]



Windpfeile aggregiert in 200 m Auflösung

Sonstiges



Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)	Bodenfeuchte: 60 %
Projektleitung Elke Hipler	Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag	Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)
Interne Projektnummer 2_23_006	Starttemperatur 24,7 °C in 2 m ü. NHN	Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
Verwendetes Modell FITNAH-3D	Zukunftsszenario II (starker Klimawandel) Zeitspanne: 2031- 2060 RCP- Szenario: 4.5 Statistik: 75. Perzentil	
Horizontale räumliche Auflösung 5 m		

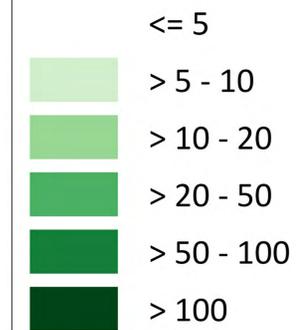
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxembourg TM (ESPG: 2169)



Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

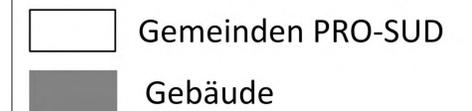
Modellergebnisse Nachtsituation (um 4:00 Uhr) Ist - Situation

Kaltluftvolumenstrom [$m^3/(s*m)$]



Windpfeile aggregiert in 200 m Auflösung

Sonstiges



Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)	Bodenfeuchte: 60 %
Projektleitung Elke Hipler	Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag	Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)
Interne Projektnummer 2_23_006	Starttemperatur 22,0 °C in 2 m u. NHN	Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
Verwendetes Modell FITNAH-3D	Horizontale räumliche Auflösung 5 m	

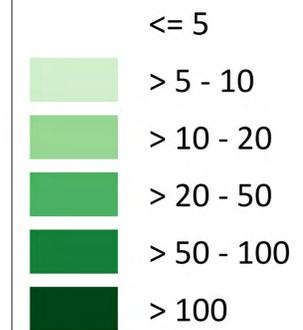
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF-Luxembourg TM (ESPG: 2169)



Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

Modellergebnisse Nachtsituation (um 4:00 Uhr) Zukunftsszenario I

Kaltluftvolumenstrom [$m^3/(s*m)$]



Windpfeile aggregiert in 200 m Auflösung

Sonstiges

- Gemeinden PRO-SUD
- Gebäude
- Städtebauliche Entwicklungsflächen

Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)	Bodenfeuchte: 60 %
Projektleitung Elke Hipler	Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag	Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)
Interne Projektnummer 2_23_006	Starttemperatur 22,7 °C in 2 m ü. NHN	Anteil: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
Verwendetes Modell FITNAH-3D	Zukunftsszenario I (schwacher Klimawandel) Zeitspanne: 2031- 2060 RCP- Szenario: 4.5 Statistik: 25. Perzentil	
Horizontale räumliche Auflösung 5 m		

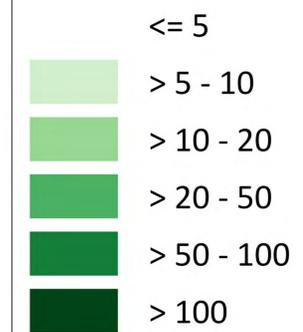
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxembourg TM (ESPG: 2169)



Stadtklimaanalyse Luxemburg Pro-Süd

Modellergebnisse Nachtsituation (um 4:00 Uhr) Zukunftsszenario II

Kaltluftvolumenstrom [$m^3/(s*m)$]



Windpfeile aggregiert in 200 m Auflösung

Sonstiges

- Gemeinden PRO-SUD
- Gebäude
- Städtebauliche Entwicklungsflächen

Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Josephine Förster	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)	Bodenfeuchte: 60 %
Projektleitung Elke Hipler	Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag	Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)
Interne Projektnummer 2_23_006	Starttemperatur 24,7 °C in 2 m ü. NHN	Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
Verwendetes Modell FITNAH-3D	Zukunftsszenario II (starker Klimawandel) Zeitspanne: 2031- 2060 RCP- Szenario: 4.5 Statistik: 75. Perzentil	
Horizontale räumliche Auflösung 5 m		

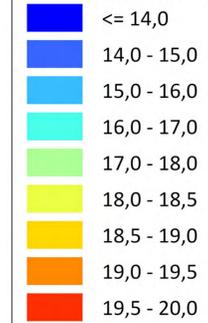
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF-Luxembourg TM (ESPG: 2169)



Klimaanalysekarte Nachtsituation (um 4:00 Uhr) Ist-Situation

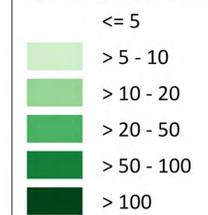
Siedlungsflächen und Straßen

Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. [°C]



Grün- und Freiflächen

Kaltluftvolumenstromdichte [$m^3/(s*m)$]



Kaltluftprozesse

- Kaltluftleitbahn
linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus umliegenden Grünflächen in das überwärmte Stadtgebiet transportiert
- Kaltluftzufluss
kühle, flächenhaft auftretende Hangabwinde und Flurwinde
- Parkwind
kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche

Kaltluftentstehungsgebiet

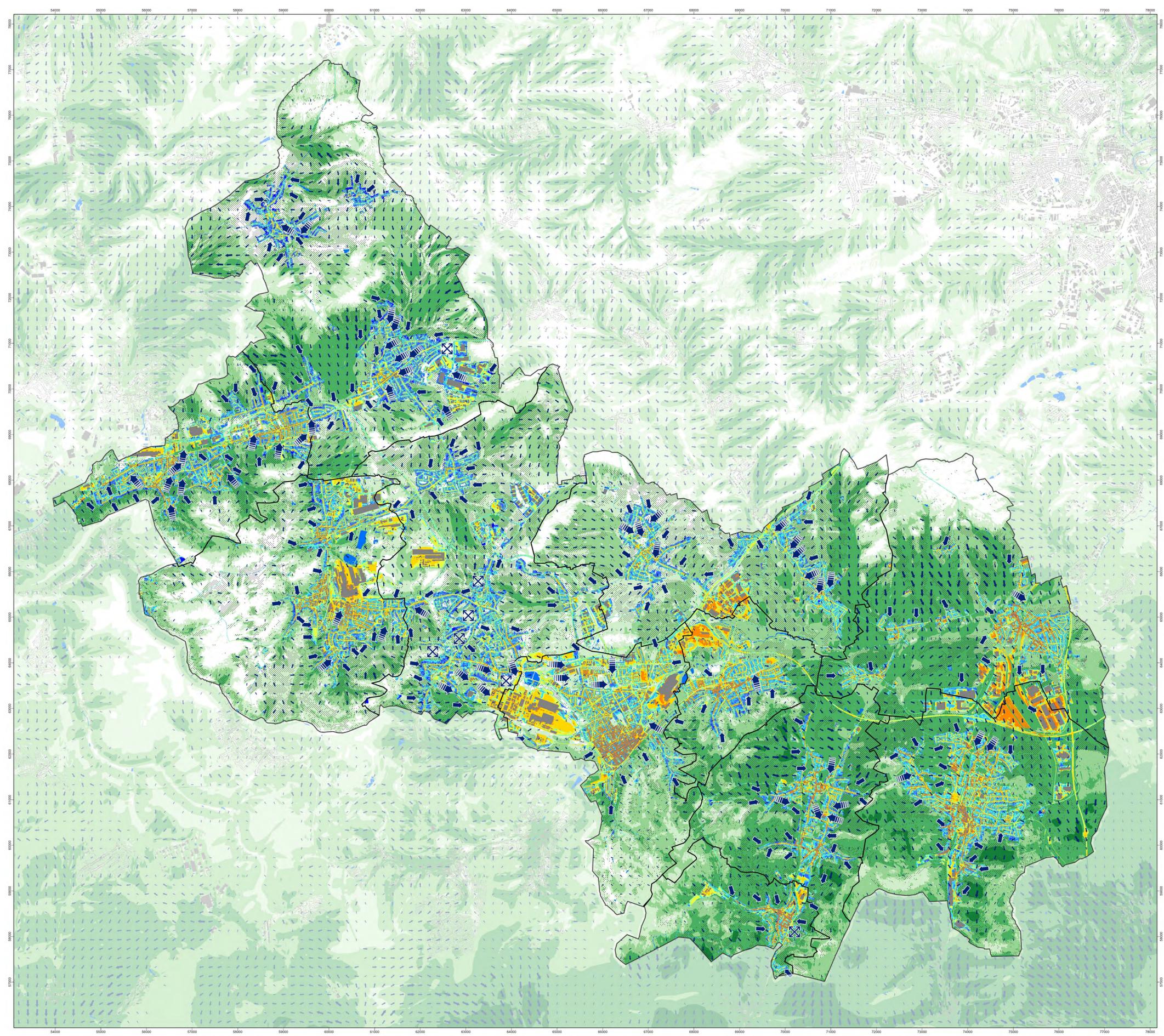
- Kaltluftentstehungsgebiet
- Windfeld in 2 m ü. Grund
($> 0,1 - 0,3$ | $> 0,3 - 1,0$ | $> 1,0$ m/s)
Windpfeile aggregiert in 200 m Auflösung

Sonstiges

- Gemeinden PRO-SUD
- Gebäude
- Gewässer

Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Elke Hipler	Meteorologische Randbedingungen Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)	Bodenfeuchte: 60 %
Projektleitung Elke Hipler	Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag	Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)
Interne Projektnummer 2_23_006	Starttemperatur 22,0 °C in 2 m ü. NHN	Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung
Verwendetes Modell FITNAH-3D	Horizontale räumliche Auflösung 5 m	

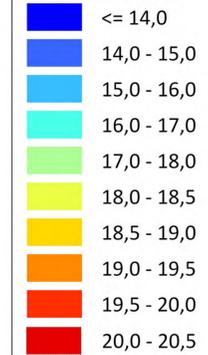
Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF-Luxembourg TM (ESPG: 2169)



Klimaanalysekarte Nachtsituation (um 4:00 Uhr) Zukunftsszenario I

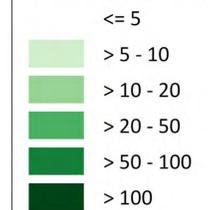
Siedlungsflächen und Straßen

Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. [°C]



Grün- und Freiflächen

Kaltluftvolumenstromdichte [$m^3/(s*m)$]



Kaltluftprozesse

- Kaltleitbahn / Funktion im Zukunftsszenario gefährdet
linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus umliegenden Grünflächen in das überwärmte Stadtgebiet transportiert
- Kaltluftzufluss / Funktion im Zukunftsszenario gefährdet
kühle, flächenhaft auftretende Hangabwinde und Flurwinde
- Parkwind
kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche
- Windfeld in 2 m ü. Grund
(> 0,1 - 0,3 | > 0,3 - 1,0 | > 1,0 m/s)
Windpfeile aggregiert in 200 m Auflösung
- Kaltluftentstehungsgebiet

Sonstiges

- Gemeinden PRO-SUD
- städtebauliche Entwicklungsflächen
- Gebäude
- Gewässer

<p>Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Elke Hipler</p> <p>Projektleitung Elke Hipler</p> <p>Interne Projektnummer 2_23_006</p> <p>Verwendetes Modell FITNAH-3D</p> <p>Horizontale räumliche Auflösung 5 m</p>	<p>Meteorologische Randbedingungen</p> <p>Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)</p> <p>Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag</p> <p>Starttemperatur 22,7 °C in 2 m ü. NHN</p> <p>Zukunftsszenario I (schwacher Klimawandel) Zeitspanne: 2031 - 2060 RCP-Szenario: 4.5 Statistik: 25. Perzentil</p>	<p>Bodenfeuchte: 60 %</p> <p>Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)</p> <p>Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung</p>
---	---	---

Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxembourg TM (ESPG: 2169)



Klimaanalysekarte Nachtsituation (um 4:00 Uhr) Zukunftsszenario II

Siedlungsflächen und Straßen

Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. [°C]

15,0 - 16,0	19,5 - 20,0
16,0 - 17,0	20,0 - 20,5
17,0 - 18,0	20,5 - 21,0
18,0 - 18,5	21,0 - 21,5
18,5 - 19,0	21,5 - 22,0
19,0 - 19,5	22,0 - 22,5

Grün- und Freiflächen

Kaltluftvolumenstromdichte [$m^3/(s \cdot m)$]

<= 5
> 5 - 10
> 10 - 20
> 20 - 50
> 50 - 100
> 100

Kaltluftprozesse

- Kaltluftleitbahn / Funktion im Zukunftsszenario gefährdet
linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus umliegenden Grünflächen in das überwärmte Stadtgebiet transportiert
- Kaltluftzufluss / Funktion im Zukunftsszenario gefährdet
kühle, flächenhaft auftretende Hangabwinde und Flurwinde
- Parkwind
kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche
- Windfeld in 2 m ü. Grund
(> 0,1 - 0,3 | > 0,3 - 1,0 | > 1,0 m/s)
Windpfeile aggregiert in 200 m Auflösung
- Kaltluftentstehungsgebiet

Sonstiges

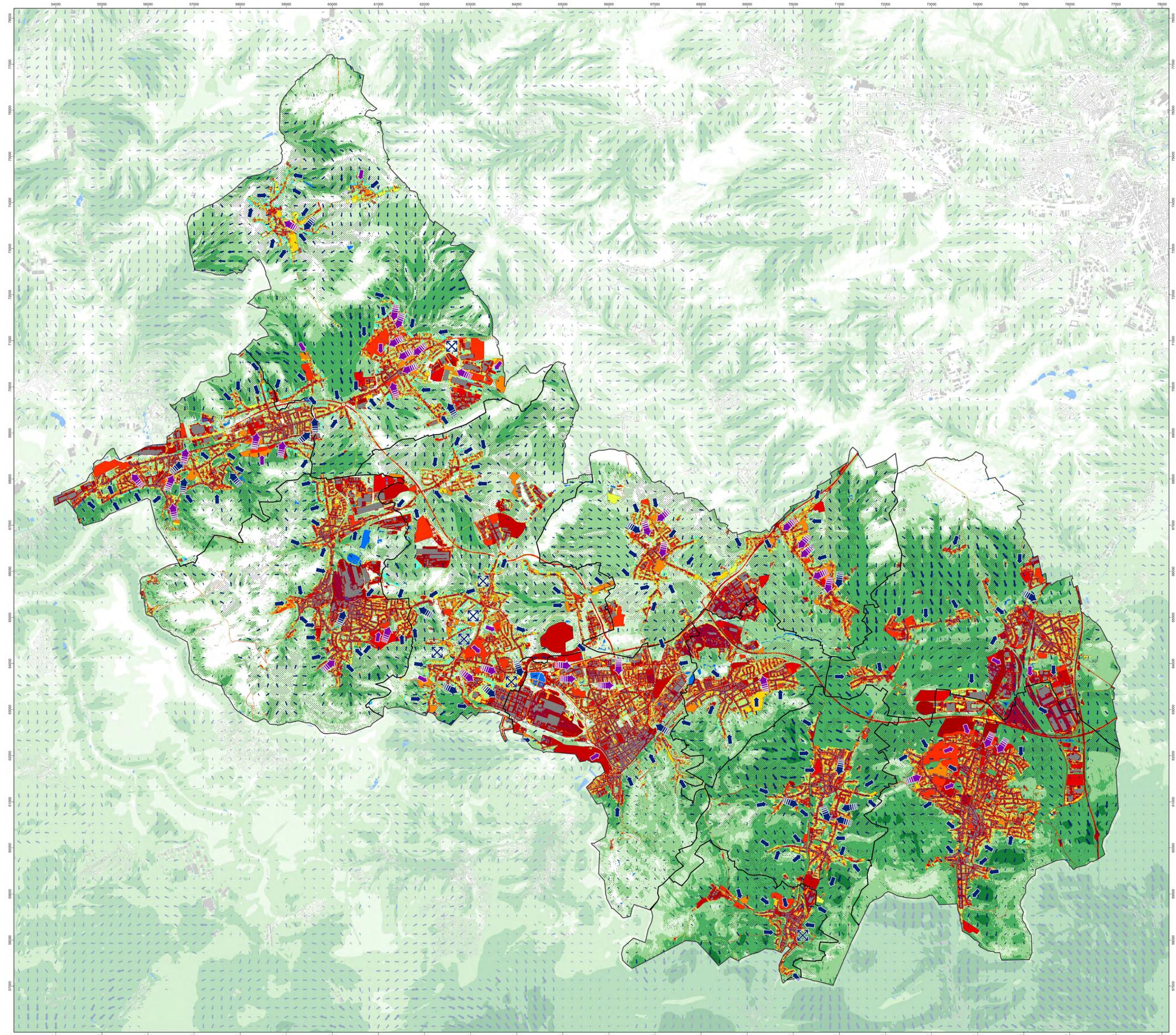
- Gemeinden PRO-SUD
- städtebauliche Entwicklungsflächen
- Gebäude
- Gewässer

<p>Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Elke Hipler</p> <p>Projektleitung Elke Hipler</p> <p>Interne Projektnummer 2_23_006</p> <p>Verwendetes Modell FITNAH-3D</p> <p>Horizontale räumliche Auflösung 5 m</p>	<p>Meteorologische Randbedingungen</p> <p>Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)</p> <p>Modellierungszeitraum: 21:00 bis 14:00 Folgetag</p> <p>Starttemperatur 24,7 °C in 2 m ü. NHN</p> <p>Zukunftsszenario II (starker Klimawandel) Zeitspanne: 2031 - 2060 RCP-Szenario: 4.5 Statistik: 75. Perzentil</p>	<p>Bodenfeuchte: 60 %</p> <p>Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)</p> <p>Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung</p>
--	---	--

Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxembourg TM (ESPG: 2169)

0 1 2 4 Kilometer

N



Stadtklimaanalyse Luxemburg PRO SUD Planungshinweiskarte

AUSGLEICHSRAUM

STADTKLIMATISCHER SCHUTZBEDARF

In die Bewertung fließen sowohl die nächtliche Kaltluftentstehung und Kaltluftströmung auf den Flächen, als auch deren Funktion als Rückzugsorte an heißen Tagen ein.

sehr hoher Schutzbedarf

Der Erhalt der stadtklimatischen Funktion ist notwendig und prioritär. Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung oder Verbesserung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung) nachzuweisen. Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten. Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens kann dies über eine fachliche Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung erfolgen.

hoher Schutzbedarf

Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung oder Verbesserung der stadtklimatischen Funktion anzustreben (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Einschätzung vorzunehmen, bei größeren Vorhaben kann eine modellhafte Untersuchung erforderlich sein.

erhöhter Schutzbedarf

Bei Eingriffen in die Fläche ist auf die stadtklimatische Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei größeren Vorhaben ist eine klimafachliche Begleitung anzustreben.

kein besonderer Schutzbedarf

Die Flächen weisen für den derzeitigen Siedlungsraum keine besondere stadtklimatische Funktion auf. Eingriffe sollten nur unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.

WIRKRAUM

STADTKLIMATISCHE HANDLUNGSPRIORITÄT

Die Bewertung beruht in bewohnten Gebieten hauptsächlich auf den Schlafbedingungen (nächtliche Überwärmung und Kaltluftfunktion), in unbewohnten Gebieten vorrangig auf der Aufenthaltsqualität im Außenraum. Grundsätzlich wird die Einhaltung klimaökologischer Standards in allen Flächen empfohlen. Die Bewertung soll eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind. Daraus ergibt sich explizit keine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen.

Handlungspriorität 1

Handlungspriorität 2

Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind notwendig und je nach ihrer Wirksamkeit zu priorisieren. Im Bestand ist die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen zu prüfen. Es sollte keine weitere Verdichtung (insbesondere zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

Handlungspriorität 3

Handlungspriorität 4

Handlungspriorität 5

Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation werden empfohlen. Je nach Tag- bzw. Nachtsituation ggfs. zusätzliche Begrünung und Verschattung sowie Entsiegelung oder Verbesserung der Durchlüftung notwendig. Freiflächen sollten erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.

Handlungspriorität 6

keine vorrangige Handlungspriorität

Die günstige bioklimatische Situation ist auch bei allen baulichen Entwicklungen möglichst zu erhalten oder zu verbessern. Klimaökologische Standards sind dabei einzuhalten (Bäume, Begrünung, geringe Versiegelung usw.).

STÄDTEBAULICHE ENTWICKLUNGSFLÄCHEN

die städtebaulichen Entwicklungsflächen gingen in den Zukunftsszenarien in die Modellberechnungen ein. PAP Flächen > 5000 m² wurden hinsichtlich ihrer stadtklimatischen Verträglichkeit bewertet.

bereits genehmigte Teilbebauungspläne PAP RaumPlus - Potentialflächen

Bewertung der stadtklimatischen Verträglichkeit der PAP

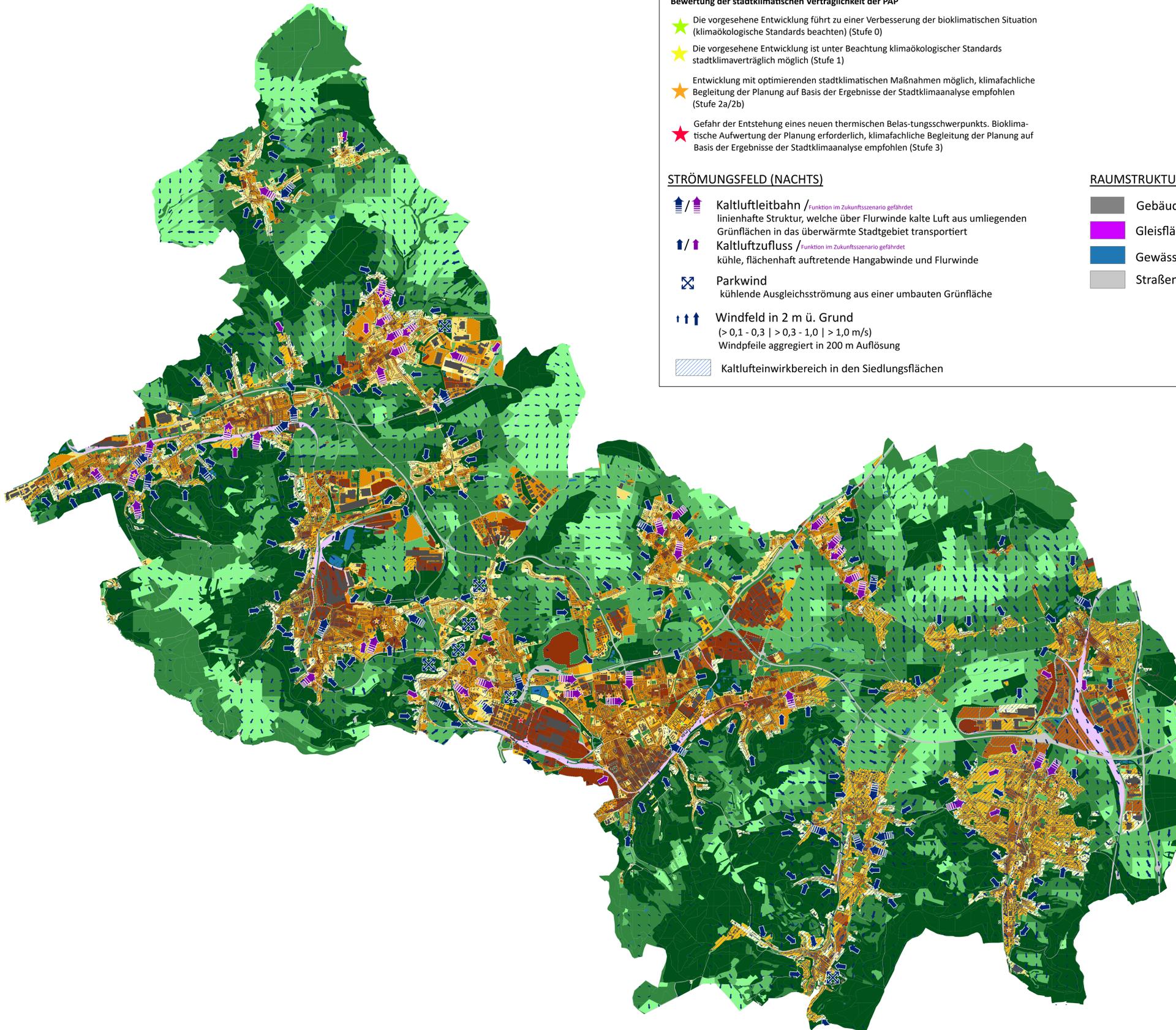
- Die vorgesehene Entwicklung führt zu einer Verbesserung der bioklimatischen Situation (klimaökologische Standards beachten) (Stufe 0)
- Die vorgesehene Entwicklung ist unter Beachtung klimaökologischer Standards stadtklimaverträglich möglich (Stufe 1)
- Entwicklung mit optimierenden stadtklimatischen Maßnahmen möglich, klimafachliche Begleitung der Planung auf Basis der Ergebnisse der Stadtklimaanalyse empfohlen (Stufe 2a/2b)
- Gefahr der Entstehung eines neuen thermischen Belastungsschwerpunkts. Bioklimatische Aufwertung der Planung erforderlich, klimafachliche Begleitung der Planung auf Basis der Ergebnisse der Stadtklimaanalyse empfohlen (Stufe 3)

STRÖMUNGSFELD (NACHTS)

- Kaltluftleitbahn / Funktion im Zukunftsszenario gefährdet
linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus umliegenden Grünflächen in das überwärmte Stadtgebiet transportiert
- Kaltluftzufluss / Funktion im Zukunftsszenario gefährdet
kühle, flächenhaft auftretende Hangabwinde und Flurwinde
- Parkwind
kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche
- Windfeld in 2 m ü. Grund
(> 0,1 - 0,3 | > 0,3 - 1,0 | > 1,0 m/s)
Windpfeile aggregiert in 200 m Auflösung
- Kaltlufteinwirkungsbereich in den Siedlungsflächen

RAUMSTRUKTUR

- Gebäude
- Gleisflächen
- Gewässer
- Straßen außerorts (unbewertet)



Bearbeitet von Nadja Krause, Lars Gerling und Elke Hipler	Meteorologische Randbedingungen Bodenfeuchte: 60 %	Verwendetes Modell FITNAH-3D
Projektleitung Elke Hipler	Wetterlage: autochthon (0/8 Bewölkung)	Horizontale räumliche Auflösung 5 m
Interne Projektnummer 2_23_006	Basisdatum: 21.06. (Sonnenhöchststand)	Antrieb: aus FITNAH-Modellierung für regionale Klimaanalyse von Luxemburg (2021) in 25 m Auflösung

Maßstab: 1 : 30 000 (im A0-Format)
Koordinatensystem: LUREF Luxembourg TM (ESPG: 2169)

Kilometer

Kartenerstellung: Rev00, 20. Juni 2024

Die Planungshinweiskarte Stadtklima zeigt die auf das Schutzgut "Mensch" ausgerichtete klimatische Bewertung des Siedlungs- und Ausgleichsraums in der Region Luxemburg PRO SUD für eine sommerliche Strahlungswetterlage und leitet daraus allgemeine Planungshinweise ab. Es handelt sich hierbei um klimafachliches Abwägungsmaterial. Die Bewertung kombiniert die Tag- und Nacht-Situation und berücksichtigt die heutige Situation sowie die Auswirkungen des Klimawandels in zwei verschiedenen Szenarien für die Periode 2030 - 2060. Priorität erhalten dabei die Hitze-Belastungen bzw. Ausgleichsfunktionen der jetzigen Situation. Für detaillierte Informationen und Bewertungsgrundlagen sollten die Einzelbewertungen für die Tag- bzw. Nachtsituation sowie die Klimaanalysekarte und auch die Modell-Ergebnisse der einzelnen Klimaparameter selbst herangezogen werden. Für die städtebaulichen Entwicklungsflächen wird in den PAP Flächen die geplante Bebauung dargestellt. In den RaumPlus-Potentialflächen ging die Bebauung nur als statistische Verteilung im Raum ein, kann somit nicht abgebildet werden. In allen anderen Flächen wird die aktuelle (2022/2023) Baustruktur abgebildet.