

Philipps-Universität Marburg

## **Fachbereich 19 Geographie**

Sommersemester 2021

Projektseminar

Der Klimawandel und seine Folgen

Leitung:

Dr. Boris Thies

### **Modellierungsansatz der Auswirkungen des durchschnittlichen globalen Meeresspiegelanstiegs nach *Representative Concentration Pathways (RCP)* auf die deutsche Nordseeküste am Beispiel Wilhelmshavens**

vorgelegt von:

Martin Monkos

stud. geogr. (B.Sc.), 12. Fachsemester

Matrikelnummer 2743361

Kontakt: Monkos@students.uni-marburg.de

Abgabedatum: 23.09.2021

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Daten</b>	<b>3</b>
2.1 Digitales Höhenmodell – SRTM-Daten	3
2.2 CORINE Land Cover – Landnutzungsklassifikation	3
2.3 Open Street Map – Vektor-Daten zu Gebietsgrenzen	3
<b>3. Methoden</b>	<b>4</b>
<b>4. Ergebnisse</b>	<b>7</b>
<b>5. Diskussion</b>	<b>10</b>
<b>6. Fazit</b>	<b>12</b>
<b>Literatur</b>	<b>12</b>

# 1. Einleitung

Ein wichtiges Werkzeug zur quantitativen Untersuchung des Klimawandels und der Modellierung der Auswirkungen anthropogener Treibhausgasemissionen in allen Bereichen der Geosphäre stellen die *Representative Concentration Pathways* (RCP) dar (VAN VUUREN ET AL. 2011, S.5ff.). Diese Klimamodellierungen erlauben plausible Vorhersagen für Zeiträume bis zum Jahr 2100, als auch darüber hinaus bis 2300 (ebd., S.7). Die RCPs werden in vier Kategorien eingeteilt: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 und RCP 8.5 (ebd.), wobei die numerische Bezeichnung die Erhöhung des globalen, mittleren Strahlungsantriebs durch anthropogene Treibhausgase in  $\text{W/m}^2$  zum Basisjahr 1850 darstellt (ebd., S.7 und S.8ff.). Im Einzelnen bestehen diese RCPs aus einer Reihe von Szenarios wissenschaftlicher Literatur zur Klimamodellierung und besitzen somit repräsentativen Charakter (ebd., S.7). Insgesamt beschreibt also das Klimamodell bzw. -szenario 2.6 den besten anzunehmenden Fall und das Szenario 8.5 den schlechtesten innerhalb der RCPs, wobei die Unterscheidung des besten und schlechtesten Falls Bezug nimmt auf die der jeweiligen Modellierung zugrunde liegende, angenommene, atmosphärische Treibhausgaskonzentration.

Im Bericht des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPPC) des Jahres 2014 (IPCC 2014) getroffener Aussagen zum globalen, durchschnittlichen Meeresspiegelanstieg (*Global Mean Sea Level Rise*; GMSL/GMSLR) liegen die Klimamodelle der RCPs zugrunde (ebd., S. 60). Dabei wird im IPCC-Bericht (ebd., S.60ff.) von einem wahrscheinlichen GMSLR unter der Modellierung des RCP 2.6 eine Spannweite des Anstiegs von 0,26-0,55 Metern im Zeitraum 2081-2100 angenommen. Die Annahme des GMSLR unter RCP 8.5, für selbigen Zeitraum, liegt in der Spannweite 0,45-0,82 Metern (ebd.). In einer Studie von HORTON ET AL. (2020) aus dem Jahr 2020, welche eine zusammenfassende Auswertung wissenschaftlicher Studien zur RCP-Modellierung von Experten darstellt, wurden im Ergebnis die im IPCC-Bericht genannten Spannweiten für den GMSLR nach aller RCPs deutlich erhöht; sowie um eine GMSLR-Modellierung bis 2300 erweitert zusammengefasst (ebd., S.4). Dabei gehen HORTON ET AL. (ebd.) von einer sehr wahrscheinlichen GMSLR-Spannweite bei RCP 2.6 von 0,21-0,82 Metern bis 2100 aus; respektive von 0,45-1,65 Metern bei RCP 8.5 (ebd.). Für die Modellierung des GMSLR bis 2300 unter RCP 2.6 wird eine sehr wahrscheinliche Spannweite von 0,24-3.11 Metern und unter RCP 8.5 0,88-7,83 Metern angenommen (ebd.).

Die deutsche Nordseeküste ist ca. 1600 km lang, wovon der größte Teil rel. flach ist (STERR 2008, S.381). Ein nach HORTON ET AL. (2020, S.4) angenommener GMSLR der maximalen Spannweitenwerte könnte zu dauerhaften Überflutungen von Küstenstädten führen, insofern keine Anpassungsmaßnahmen (bspw. Deicherhöhung, Polderung etc.) ergriffen werden.

Nachfolgend wird für das gesamte Stadtgebiet Wilhelmshavens eine Überflutungssimulation anhand der Maximalwerte der GMSLR-Spannweiten von HORTON ET AL. (ebd.) durchgeführt. Wilhelmshaven liegt an der deutschen Nordseeküste in der Jadebusen Meeresbucht (siehe Abbildung 1) und hat eine Gesamtfläche von ca. 103 km<sup>2</sup> (in Bezug zur administrativen Grenze (OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS o.J.)) mit ca. 79.000 Einwohner (STADT WILHELMSHAVEN 2020, S.12).



*Abbildung 1: Lage der Stadt Wilhelmshaven (Datengrundlage: Google Satellite (GOOGLE WEB MAP SERVICE o.J.), Konturen: Open Street Map (OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS o.J.), eigene Darstellung).*

Erstes Ziel der Arbeit ist die Quantifizierung der überfluteten urbanen, unbebauten und bewaldeten Flächen. Das zweite Ziel ist die approximative Quantifizierung der von der

Überflutung betroffenen Einwohner. Insgesamt wird für das Überflutungsszenario eine Berechnung auf Grundlage eines gerasterten, digitalen Höhenmodells (DHM) der *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (U.S. GEOLOGICAL SURVEY o.J.) durchgeführt.

## **2. Daten**

Zur Berechnung des GMSLR wird das digitale Höhenmodell (DHM) der SRTM-Mission verwendet. Informationen zur Landnutzung im gesamten Stadtgebiet werden aus *CORINE Land Cover* Daten des *Copernicus* Programms bezogen (COPERNICUS PROGRAMME 2021) und die administrative Abgrenzung des Stadtgebiets, sowie einzelner Stadtbezirke wird mittels frei zugänglichen *Open Street Map* Daten (OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS o.J.) durchgeführt. Die Einwohnerzahlen einzelner Stadtbezirke und die daraus resultierende Gesamteinwohnerzahl der Stadt Wilhelmshaven werden dem Jahresbericht Bevölkerungsstatistik der städtischen Behörden entnommen (STADT WILHELMSHAVEN 2020, S.12).

### **2.1 Digitales Höhenmodell – SRTM-Daten**

Das frei verfügbare digitale Höhenmodell aus SRTM-Daten (SRTM-DHM) wurde von *U.S. Geological Survey* (USGS) bezogen (U.S. GEOLOGICAL SURVEY o.J.). Da das Untersuchungsgebiet nicht in Gänze von einem Datensatz abgedeckt wird, wurden die Raster-Kacheln der *EntityID SRTM1N53E007V3* und *SRTM1N53E008V3* vereinigt. Das DHM liegt im Raster-Format mit einer räumlichen Auflösung von 1-Bogensekunde (Gitterweite ~30 Meter) in der Projektion EPSG 4326 vor (U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2015). Das Bezugsjahr der Daten ist 2014.

### **2.2 CORINE Land Cover – Landnutzungsklassifikation**

Zur Ermittlung der Landnutzung des Stadtgebiets Wilhelmshavens wurden frei verfügbare *CORINE Land Cover* Daten (CLC) aus dem Jahr 2018 (CLC 2018) verwendet (COPERNICUS PROGRAMME 2021). Die Daten des Jahres 2018 liegen im Raster-Format mit einer Gitterweite von 100 Metern und der flächentreuen Projektion EPSG 3035 vor; die Metadaten der insgesamt 44 Landnutzungsklassen sind dem Datensatz angefügt (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY 2021).

### **2.3 Open Street Map – Vektor-Daten zu Gebietsgrenzen**

Als Schnittmaske für das gesamte Untersuchungsgebiet Stadt Wilhelmshaven und der einzelnen Stadtbezirke wurden Daten von *Open Street Map* (OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS o.J.) verwendet. Diese sind ebenfalls frei verfügbar und wurden über

das Plugin QuickOSM (TRIMAILLE 2021) in QGIS 3.18.1 (QGIS.ORG 2021) mit dem *Preset Geography/Boundaries/Administrative*, bezogen. Die Daten liegen als *Feature-Class* im ESRI-Shapefile-Format vor, wobei die Projektion nach Bedarf anpassbar ist.

### 3. Methoden

Die Modellierung des GMSLR der RCP-Szenarien sowie die Berechnung der Ergebnisstatistiken wurde insgesamt mit R (R CORE TEAM 2021) durchgeführt. Der Bezug der Schnittmasken wurde in QGIS durchgeführt. Der gesamte Arbeitsablauf, Prozessierung und Zusammenhang der Daten, ist in Abbildung 2 verdeutlicht.

Im ersten Schritt werden die akquirierten OSM-Daten und das SRTM-DHM Raster in die Projektion der CLC-Daten überführt. Eine Verschiebung der Datenspannweite des SRTM-DHM-Rasters durch die Reprojektion ist aufgrund ihrer stetigen Verteilung vernachlässigbar, während eine Reprojektion des diskreten (klassifizierten) CLC-Rasters zu fehlerhaften Werten führt. Da es sich bei der EPSG 3035 Projektion um eine flächentreue Projektion handelt, können im späteren Verlauf der Prozessierung Statistiken mit Flächenbezug berechnet werden.

Den OSM-Daten werden im nächsten Schritt die einzelnen Vektoren für die gesamte Stadt Wilhelmshaven, als auch für die einzelnen Stadtbezirke, extrahiert. Den Schnittmasken der Stadtbezirke werden die Einwohnerzahlen aus dem Jahresbericht Bevölkerungsstatistik (STADT WILHELMSHAVEN 2020, S.12) zugewiesen. Die Schnittmasken dienen dem Zuschnitt des SRTM-DHM-Rasters auf das Untersuchungsgebiet.

Das zugeschnittene SRTM-DHM wird anschließend disaggregiert um eine höhere Auflösung der Daten zu erhalten. Die Höhenwerte der Originaldaten liegen ganzzahlig vor, während die Durchführung der Modellierung Gleitkommazahlen voraussetzt. Die Disaggregation wurde mit dem *raster-Package* (HIJMANS 2021) und der Funktion *disaggregate* (ebd., S.70) durchgeführt. Die räumliche Auflösung wurde um den Faktor 3 erhöht, wobei für die Interpolation der Rasterwerte die bilineare Interpolationsmethode verwendet wurde. Das verfeinerte und von ganzzahligen Werten in Gleitkommawerte interpolierte Raster wurde anschließend für das *Resampling* der CLC-Daten verwendet, wobei bei der *Resampling*-Methode die Interpolationsmethode *nearest neighbor* verwendet wurde, da es sich um diskret verteilte Daten handelt.

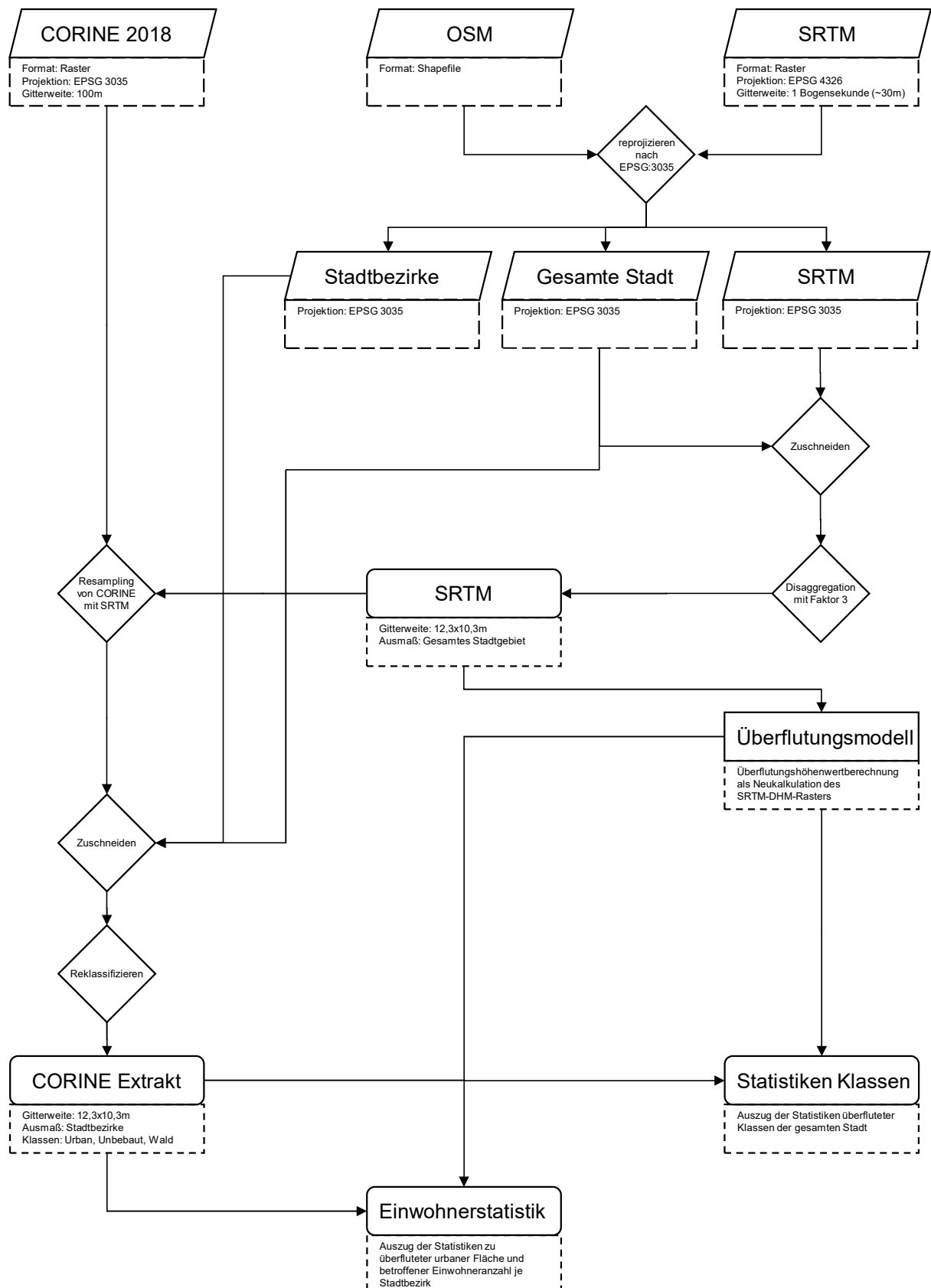


Abbildung 2: Arbeitsablauf, Prozessierung und Zusammenhang (eigene Darstellung).

Das verfeinerte CLC-Raster wurde anschließend mit den Vektordaten auf das gesamte Stadtgebiet zugeschnitten. Dies führt zur Reduzierung der Klassen im Ergebnisraster und macht eine Reklassifizierung übersichtlich. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der auf Wilhelmshaven zugeschnittenen Klassen des CLC-Rasters, sowie ihrer Reklassifizierungsklassen dargestellt.

CORINE ID	CORINE Klassenname	Reklassifizierung
1	Continuous urban fabric	Urban
2	Discontinuous urban fabric	
3	Industrial or commercial units	
6	Airports	
8	Dump sites	
10	Green urban areas	
11	Sport and leisure facilities	
12	Non-irrigated arable land	Unbebaut
18	Pastures	
23	Broad-leaved forest	Wald
25	Mixed forest	
26	Natural grasslands	Unbebaut
29	Transitional woodland-shrub	
35	Inland marshes	
37	Salt marshes	
39	Intertidal flats	ohne Klasse
41	Water bodies	
44	Sea and ocean	

*Tabelle 1: CORINE Land Cover Klasse und Reklassifizierung (eigene Darstellung).*

Das sich aus dem angenommenen GMSLR ergebende Überflutungsmodell wurde als Raster-Kalkulation auf dem SRTM-DHM-Raster durchgeführt, indem die gesuchten Höhen der maximalen Spannweiten der RCPs nach HORTON ET AL. (2020, S.4) für die RCP 2.6 und 8.5 zum Nullwert des SRTM-DHM-Rasters addiert wurden.

Abschließend wurde für die Quantifizierung der überfluteten CLC-Klassen des gesamten Stadtgebiets Wilhelmshavens das verfeinerte und reklassifizierte CLC-Raster (CORINE Extrakt) mit dem Überflutungsmodell-Raster verschnitten und die Rasterzellen der überfluteten Klassen ermittelt.

Für die Quantifizierung der betroffenen Einwohner je Stadtteil wurde das verschnittene Ergebnisraster auf die einzelnen Stadtbezirke zugeschnitten. Die Gesamteinwohnerzahl eines jeden Stadtbezirks wurde auf die Anzahl der Zellen der



Urban-Klasse anteilig berechnet. Dieser Wert ist der Ausdruck der Einwohnerdichte pro Zelle urbaner Klasse eines Stadtgebiets und konnte anschließend mit der Anzahl der Zellen urbaner, überfluteter Zellen multipliziert werden um einen Näherungswert der von der Überflutung betroffenen Einwohner zu ermitteln.

## 4. Ergebnisse

Ein Gesamtüberblick der Höhenverhältnisse auf Grundlage des SRTM-DHMs von 2014 ist in Abbildung 3 (links) und die Verteilung der reklassifizierten CLC-Daten (rechts) dargestellt. Aus dem Abgleich beider Darstellungen ist erkennbar, dass bereits 2014 weite Teile des Stadtgebiets Wilhelmshavens unter Meeresspiegelniveau (in Bezug zum Nullwert des SRTM-DHMs) liegen; überwiegend betrifft es unbebaute Flächen. Gleichzeitig ist zu erahnen, dass urbane Flächen weitestgehend über dem Meeresspiegelniveau des DHMs liegen.

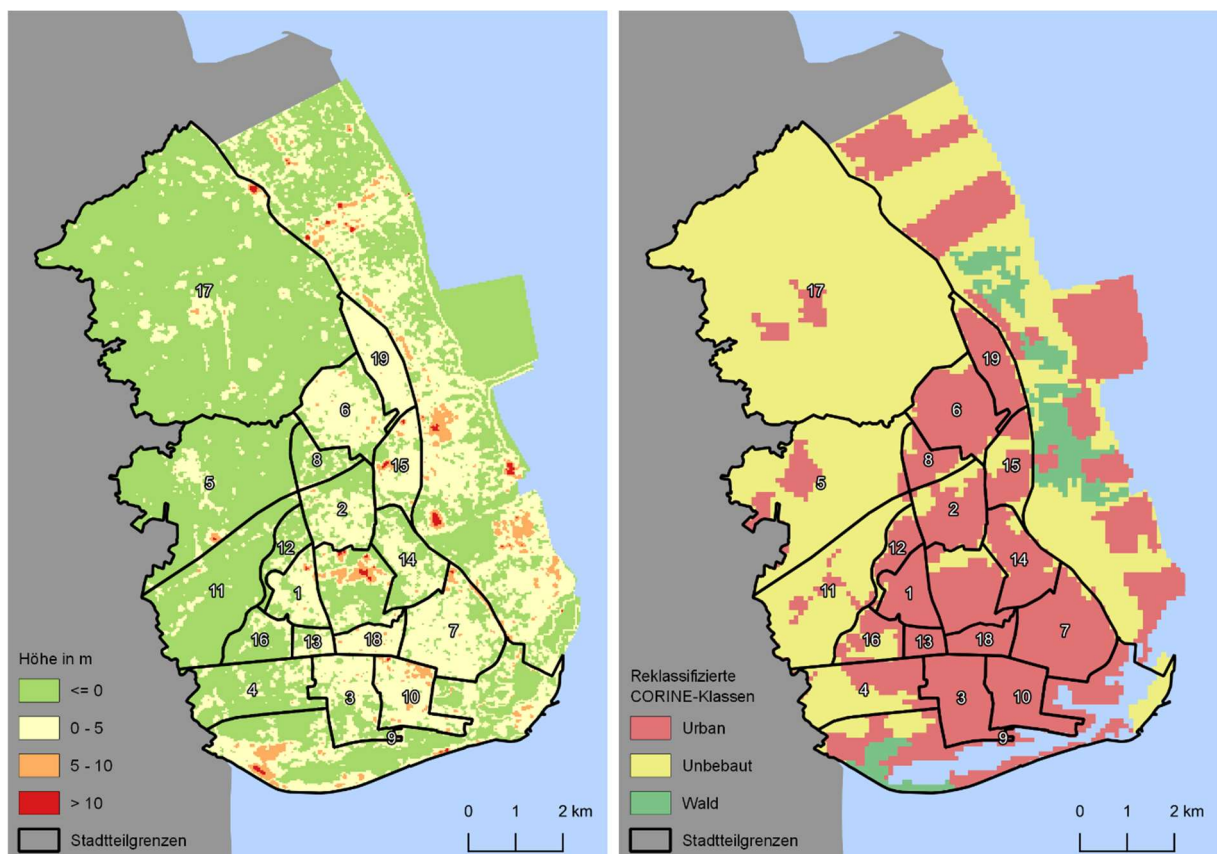


Abbildung 3: Höhenmodell (links), reklassifizierte CORINE-Klassen (rechts) (eigene Darstellung).

Das Überflutungsmodell für das Jahr 2100 nach RCP 2.6 mit einem GMSLR um +0,82 Meter und nach RCP 8.5, mit einem GMSLR um +1,65 Meter ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Modellierung für das Jahr 2300 mit einem GMSLR um +3,11 Meter (RCP 2.6) und +7,83 Meter (RCP 8.5) ist in Abbildung 5 dargestellt.

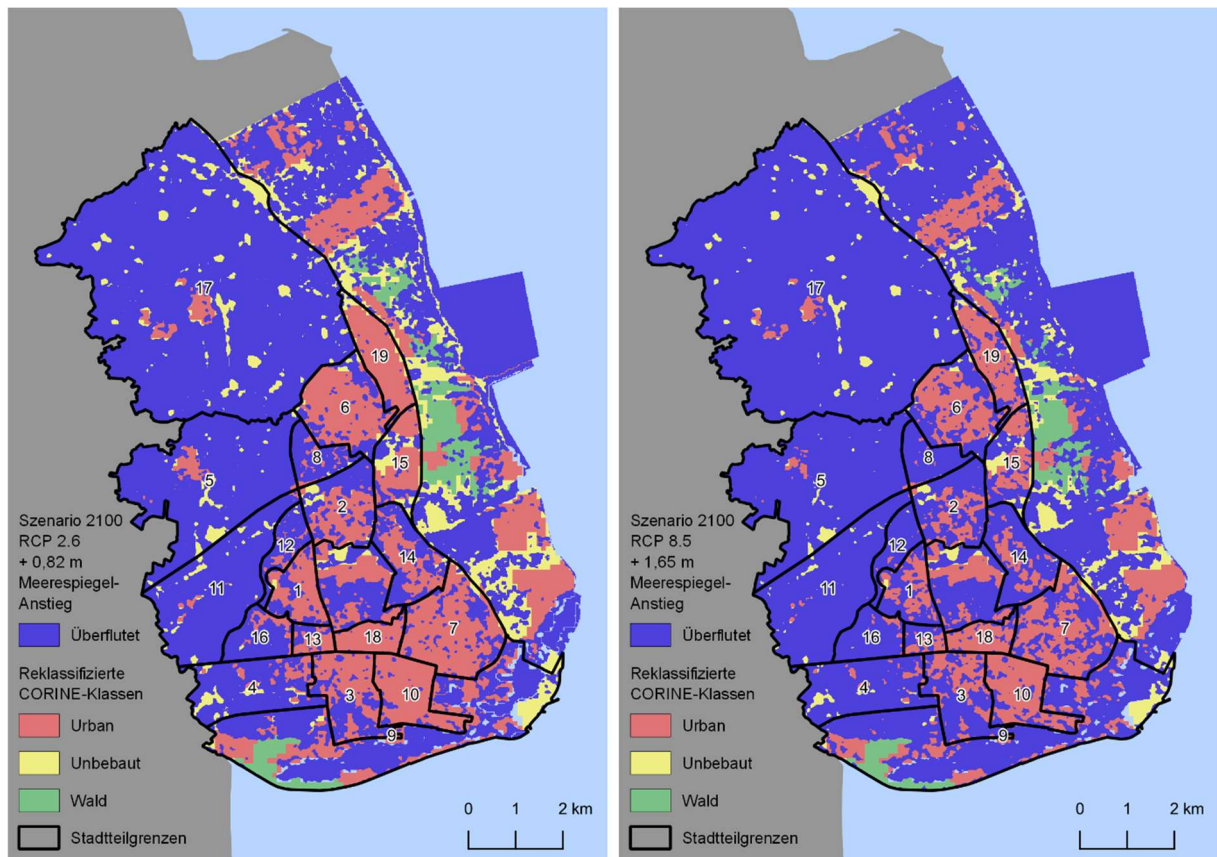


Abbildung 4: Überflutungsmodell 2100 (eigene Darstellung).

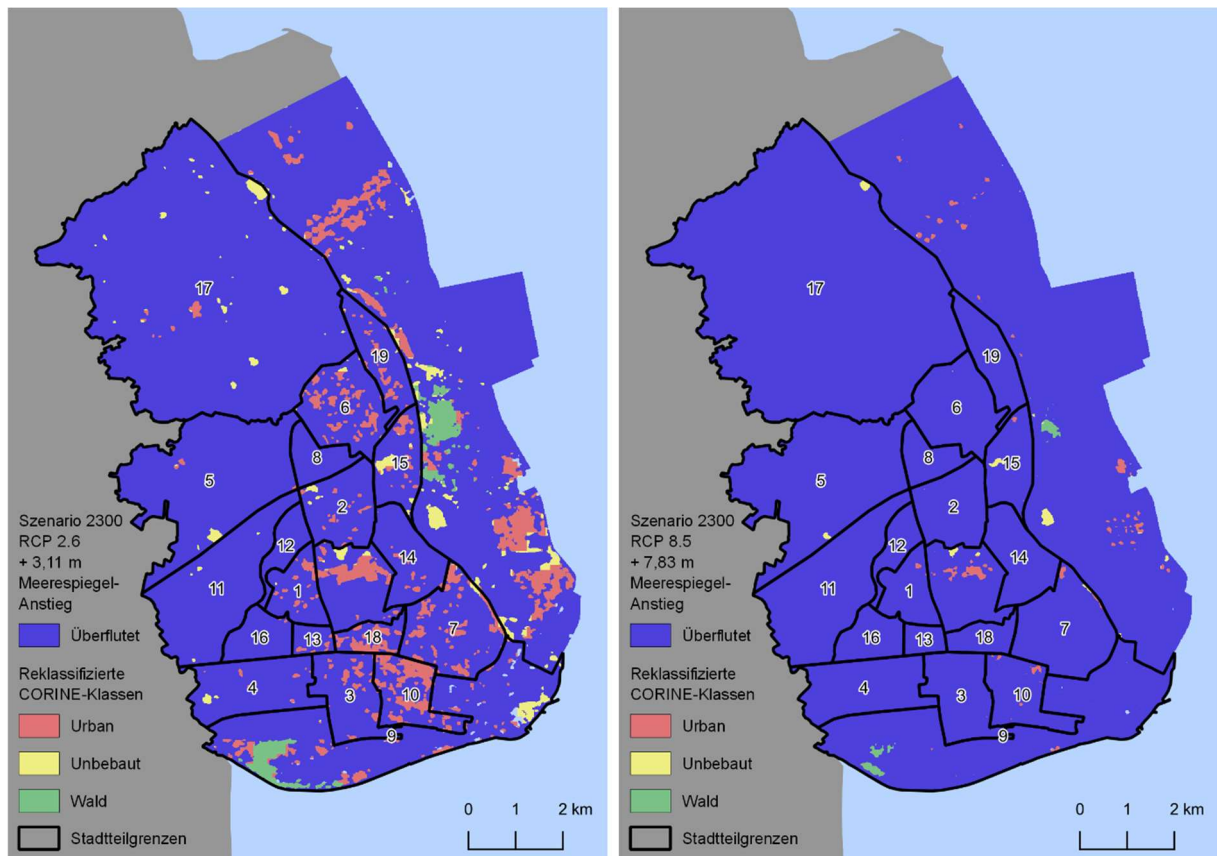


Abbildung 5: Überflutungsmodell 2300 (eigene Darstellung).

Insgesamt lässt sich für das Modell des Jahres 2100 feststellen, dass im besten Fall (RCP 2.6) ca. 52% und im schlechten Fall (RCP 8.5) ca. 64% der gesamten Stadtfläche überflutet wären (siehe Tabelle 2). Für den urbanen Bereich würde die hier angewendete Überflutungsmodellierung ca. 42% (RCP 2.6) und ca. 57% (RCP 8.5) als überflutet ausweisen (siehe Tabelle 2).

Die Modellierung für das Jahr 2300 weist eine Überflutung von 83% (RCP 2.6) und ca. 98% (RCP 8.5) für das gesamte Stadtgebiet aus. Hierbei sind ca. 84% (RCP 2.6), bzw. ca. 99% der urbanen Fläche überflutet (siehe Tabelle 2).

Klasse ↓ // Flächen in qkm →	2020	2100				2300			
		RCP 2.6 / +0,82m		RCP 8.5 / +1,65m		RCP 2.6 / +3,11m		RCP 8.5 / +7,83m	
		absolut	Anteil in %	absolut	Anteil in %	absolut	Anteil in %	absolut	Anteil in %
Urban	42,98	18,18	42,3	24,8	57,7	35,91	83,6	42,37	98,6
Unbebaut	55,56	46,92	84,4	50,24	90,4	53,57	96,4	55,23	99,4
Wald	4,47	1,35	30,2	2,01	45,0	3,09	69,1	4,25	95,1
Summen:	103,01	66,45	52,3	77,05	64,4	92,57	83,0	101,85	97,7

Tabelle 2: Auswertung der Überflutungsmodellierung nach CLC-Klassen in km (eigene Darstellung).

Die Auswertung der vom Überflutungsmodell betroffenen Einwohner im Modell des Jahres 2100 für das gesamte Stadtgebiet ergibt ca. 44% (RCP 2.6) und ca. 61% (RCP 8.5) betroffener Einwohner (siehe Tabelle 3). Für das Jahr 2300 ergeben sich für RCP 2.6 ca. 89% und für RCP 8.5 ca. 100% von der modellierten Überflutung betroffener Einwohner (siehe Tabelle 3). Die oben genannten Anteile ergeben sich als Summen betroffener Einwohner der jeweiligen Stadtbezirke unter der Annahme unterschiedlicher Bevölkerungsdichten pro Zelle des DHMs auf Basis urbaner Zellen der Stadtgebiete.

Nr. Stadtteil ↓ // Einwohnerzahl →	2020	2100				2300			
		RCP 2.6 / +0,82m		RCP 8.5 / +1,65m		RCP 2.6 / +3,11m		RCP 8.5 / +7,83m	
		absolut	Anteil in %	absolut	Anteil in %	absolut	Anteil in %	absolut	Anteil in %
1 Aldenburg	3951	1312	33,2	2290	58,0	3555	90,0	3906	98,9
2 Altengroden	3520	1370	38,9	2202	62,6	3326	94,5	3520	100,0
3 Bant	11934	4888	41,0	7450	62,4	10863	91,0	11933	100,0
4 Ebkeriege	495	356	71,9	424	85,7	478	96,6	495	100,0
5 Fedderwarden	1731	1266	73,1	1529	88,3	1686	97,4	1731	100,0
6 Fedderwardergroden	8236	1890	22,9	3390	41,2	6759	82,1	8234	100,0
7 Heppens	14932	3263	21,9	6347	42,5	12224	81,9	14765	98,9
8 Himmelreich Coldewei	1695	1334	78,7	1582	93,3	1685	99,4	1695	100,0
9 Innenhafen	543	242	44,6	338	62,2	472	86,9	541	99,6
10 Innenstadt	10788	1134	10,5	2471	22,9	6574	60,9	10562	97,9
11 Langewerth	460	373	81,1	419	91,1	460	100,0	460	100,0
12 Maadebogen	1538	1281	83,3	1473	95,8	1538	100,0	1538	100,0
13 Neuende	2177	723	33,2	1189	54,6	1907	87,6	2176	100,0
14 Neuengroden	3849	2016	52,4	2782	72,3	3690	95,9	3849	100,0
15 Rüstiersiel	2012	404	20,1	845	42,0	1702	84,6	1996	99,2
16 Schaar	2440	1741	71,4	2128	87,2	2412	98,9	2440	100,0
17 Sengwarden	1262	484	38,4	760	60,2	1112	88,1	1262	100,0
18 Siebethsburg	4149	254	6,1	788	19,0	2443	58,9	4149	100,0
19 Voslapp	3180	212	6,7	818	25,7	2787	87,6	3180	100,0
Summen:	78892	24543	43,6	39225	61,4	65673	88,5	78432	99,7

*Tabelle 3: Auswertung der von der Überflutungsmodellierung betroffenen Einwohner je Stadtteil und summiert für die gesamte Stadt Wilhelmshaven (eigene Darstellung).*

## 5. Diskussion

Insgesamt konnte eine Quantifizierung überfluteter urbaner, unbebauter und bewaldeter Flächen mit einem auf kostenlos zugänglichen SRTM-Daten basierendem DHM für das Stadtgebiet Wilhelmshavens durchgeführt werden.

Ebenfalls konnte eine approximative Quantifizierung der von der Überflutungsmodellierung betroffener Einwohner für einzelne Stadtbezirke, als auch der gesamten Stadt Wilhelmshaven durchgeführt werden.

Für beide Ergebnisse ergeben sich jedoch Unschärfen, welche auf die nicht hinreichend hohe räumliche Auflösung des DHMs, als auch der Aufnahmemethode der SRTM-Daten zurückgeführt werden können. Um eine Modellierung des GMSLR im

Gleitkommabereich hinreichend umzusetzen, wurden die Basisdaten des DHM-Rasters disaggregiert und interpoliert. Dies führt insgesamt zu einer Verschlechterung der Datenqualität des DHMs, welches eben als Berechnungsgrundlage in die Modellierung der Meeresspiegelhöhen einfließt. Die Qualität der Modellierung könnte mit einem präzisierten DHM wahrscheinlich deutlich erhöht werden.

Da das disaggregierte, interpolierte SRTM-DHM zum Resampling der CLC-Daten verwendet wird, wird eine Verschlechterung der Datenqualität hinsichtlich einer richtigen räumlichen Zuordnung der Klassen angenommen. Darüberhinaus wird ein Qualitätsverlust in den Klassen der CLC-Daten aufgrund des Resamplings vermutet. Weiterhin kann die Berechnung der von den modellierten Überflutungen betroffenen Einwohnerzahlen mehr als modellierter Richtwert angenommen werden, anstatt einer Interpretation als realistisches Abbild. Die Einwohnerstatistik der Stadt Wilhelmshaven (STADT WILHELMSHAVEN 2020, S.12) bezieht sich auf jeweilige Stadtbezirke unterschiedlicher Größe, was eine relative Quantifizierung nach Einwohner pro Quadratkilometer zulässt. Jedoch wurde die Einwohnerdichte zur Berechnung auf die Rasterzellengröße des Überflutungsmodells (12,6x10,6 Meter) umgerechnet. Somit wurde simplifiziert eine Einwohnerdichte pro Zelle des Modells angenommen, was die Qualität der gesamten Aussage je Stadtbezirk, und in der Summe für die gesamte Stadt schmälert, jedoch eine geschätzte Aussage über die Anzahl der betroffenen Einwohner ermöglicht.

Da keine Annahme über die bestehende Eindeichung getroffen wurde, noch diese in eine Modellierung eingeflossen sind, kann das Gesamtergebnis lediglich als Indikator überfluteter Flächen angesehen werden. Eine grundsätzliche Verbesserung des Gesamtergebnisses würde unter Einbezug der Geometrien der Deiche in einem Abflussmodell erreicht werden.

Somit müssen die Gesamtergebnisse der Überflutungsmodellierungen im Kontext unscharfer Datenqualitäten, als auch der Außerachtlassung bestehender (oder zukünftiger) Deichsysteme angesehen werden. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse näherungsweise die Folgen eines Meeresspiegelanstiegs, basierend auf anthropogenen Treibhausgasemissionen aktueller Klimamodellierungen.

## 6. Fazit

Die hier durchgeführte GMSLR-Modellierung für die Stadt Wilhelmshaven zeigt für das Jahr 2100 eine *worst-case* Überflutung urbaner Fläche von ca. 42-58% (RCP 2.6-RCP 8.5), und für das Jahr 2300 ca. 84-99% (RCP 2.6-RCP 8.5) auf. Dabei werden für das Jahr 2100 ca. 44-61% (RCP 2.6-RCP 8.5) und für das Jahr 2300 ca. 89-100% (RCP 2.6-RCP 8.5) der Einwohner (zum Basisjahr 2020) als von der Überflutung betroffen angenommen (siehe Tabelle 2 und 3).

Unter Außerachtlassung von Anpassungsmaßnahmen, entweder als lokale/regionale Anpassungsmaßnahmen (Eindeichung, Polderung etc.) oder der Reduzierung globaler Treibhausgasemissionen als bestimmenden Variable der RCPs, wird Wilhelmshaven nach der hier durchgeführten GMSLR-Modellierung massiv vom Meeresspiegelanstieg betroffen sein.

Die hier durchgeführte Modellierung ist nicht als repräsentativ anzusehen, besitzt jedoch trendweisenden Charakter, der die Klimafolgen der globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen für eine reale Stadt an der deutschen Nordseeküste aufzeigen kann.

## Literatur

COPERNICUS PROGRAMME (2021): CORINE Land Cover.

<<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>>  
(Zugriff: 22.09.2021).

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) (2021): Copernicus Land Monitoring Service Corine Land Cover. User Manual. Version 1.0. Kopenhagen.

GOOGLE WEB MAP SERVICE (o.J.): Google Satellite.

<<https://www.google.de/maps/preview>>. (Zugriff: 21.09.2021).

Hijmans, R.J. (2021): raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.4-13. <<https://CRAN.R-project.org/package=raster>>.

HORTON, B. P., KHAN, N.S., CAHILL, N., LEE, J. S. H., SHAW, T. A., GARNER, A.J., KEMP, A. C., ENGELHART, S. E. & S. RAHMSTORF (2020): Estimating global mean sea-level rise and its uncertainties by 2100 and 2300 from an expert survey. *Npj Climate and Atmospheric Science* (2020) 3/18.

IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. In: Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Hrsg.): Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151ff.



- OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS (o.J.): OpenStreetMap-Data. (Zugriff: 21.09.2021).
- QGIS.ORG (2021): QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <<http://www.qgis.org>>.
- TRIMAILLE, E. (2021): QuickOSM. Latest stable version: 2.0.0. QGIS Phyton Plugins Repository. <<https://plugins.qgis.org/plugins/QuickOSM/>> (Zugriff: 21.09.2021).
- R CORE TEAM (2021): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna. Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- STADT WILHELMSHAVEN (2020): Bevölkerungsstatistik – Jahresbericht 2020. Wilhelmshaven.
- STERR, H. (2008): Assessment of Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise for the Coastal Zone of Germany. Journal of Coastal Research 24/2: 380-393.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (2015): The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Collection User Guide. <[https://lpdaac.usgs.gov/documents/179/SRTM\\_User\\_Guide\\_V3.pdf](https://lpdaac.usgs.gov/documents/179/SRTM_User_Guide_V3.pdf)> (Zugriff: 21.09.2021).
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (o.J.): USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. <[https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)> (Zugriff: 21.09.2021)
- VAN VUUREN, D. P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A., HIBBARD, K., HURTT, G. C., KRAM, T., KREY, V., J-F., LAMARQUE, T., MASUI, MEINSHAUSEN. M., NAKICENOVIC. N., SMITH, S. J. & S.K. ROSE (2011) : The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change (2011) 109: 5-31.