

# Plants versus CO<sub>2</sub>

Automatisierung einer CO<sub>2</sub>-Bilanzierung

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Master of Science Geographie

29.03.2022

vorgelegt von

Nikolaos Kolaxidis & Tobias Romes

3694017 | [pd281@uni-heidelberg.de](mailto:pd281@uni-heidelberg.de)

366772 | [ha271@uni-heidelberg.de](mailto:ha271@uni-heidelberg.de)

Seminar: GIS Analyses using FOSSGIS

Seminarleitung: M.Sc. Christina Ludwig

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis .....	III
1. Einleitung.....	1
2. Methodenüberblick.....	2
2.1 NDVI & NDVI-Thresholds .....	3
2.2 Kalkulation & Bilanzierung.....	5
3. Daten & Methodik.....	6
3.1 Data Acquisition.....	6
3.1.1 Räumliche Daten: Raster .....	7
3.1.2 Räumliche Daten: Vektor .....	8
3.1.3 Kompensations- und Emissionsdaten .....	8
3.2 QGIS-Modell .....	9
3.3 Postprocessing/Kalkulation .....	13
4. Ergebnisse/Bilanzierung .....	15
5. Diskussion .....	17
6. Fazit.....	21
Literaturverzeichnis.....	22
Anhang .....	25
Eidesstattliche Erklärung.....	26

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spektralreflexionen verschiedener Bodenobjekte .....	3
Abbildung 2: Workflow vereinfacht .....	6
Abbildung 3: QGIS-Modell.....	10
Abbildung 4: Eingabefenster des QGIS-Modells .....	11
Abbildung 5: Farbig codierter reklassifizierter NDVI der Stadt Heidelberg. Dunkelgrün = hohe Vegetation ( $NDVI \geq 0.6$ ), hellgrün = mittlere Vegetation ( $0.4 \leq NDVI \leq 0.599$ ), gelb = niedere Vegetation ( $0.2 \leq NDVI \leq 0.399$ ) und rot = keine Vegetation ( $NDVI \leq 0.199$ ).....	12
Abbildung 6: Excelsheet (leer) mit Angaben zu den vier Vegetationsklassen und einer Spalte für Ergebnisse der NDVI-Analyse .....	13
Abbildung 7: Excelsheet (leer) mit Angaben zu Kompensationswerten für die jeweiligen Klassen (links) und für die verrechneten Kompensationsfähigkeitswerte (rechts) .....	14
Abbildung 8: Excelsheet (leer) für die Summen der Kompensationsfähigkeitswerte, der Emissionswerte für die Region und der Bilanz.....	14
Abbildung 9: Excelsheet mit Angaben und Werten für Heidelberg zu den vier Vegetationsklassen und einer Spalte für Ergebnisse der NDVI-Analyse.....	15
Abbildung 10: Excelsheet mit Werten für Heidelberg für die Summen der Kompensationsfähigkeitswerte, der Emissionswerte für die Region und der Bilanz .....	16
Abbildung 11: Vergleich der Raster Calculators.....	19
Abbildung 12: QGIS-Modell größer skaliert .....	25

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Reklassifikationsmatrix.....	5
Tabelle 2: Kompensationsfähigkeiten .....	8
Tabelle 3: Inhalt der Farbdefinitionsdatei für das Tool „Color Relief“ .....	13

# 1. Einleitung

Die Analyse von Geodaten und deren Automatisierung gewinnt im Zuge der zunehmenden Digitalisierung und der Verbreitung von Geoinformationssystemen (GIS) in verschiedenen Bereichen der Gesellschaft eine immer größere Bedeutung. Viele Aussagen über ökonomische, ökologische und soziale Bereiche können durch GIS-gestützte geographische Analysen getroffen und unterstützt werden. Die Bandbreite an GIS und möglichen Fragestellungen ist schier unendlich, daher wurden den Studierenden im Rahmen des Seminars „GIS Analyses using FossGIS“ frei zugängliche GIS-Tools an die Hand gegeben und klassische Themen von GIS-Analysen gezeigt. Die Studierenden konnten sich frei nach ihren Interessen orientieren und ein Projekt durchführen, welches eine automatisierte GIS-Analyse zu einer bestimmten Thematik zum Ziel hatte. Das Projekt wird mit diesem Report abgeschlossen.

Laut Bericht des IPCC (2015, S. 40, 47), dem renommiertesten Klimabericht der heutigen Zeit, befindet sich das Klima der Erde in einem Wandel, welcher unbestreitbar durch anthropogene Aktivitäten beeinflusst, „extrem wahrscheinlich“ (ebd., S. 47) sogar hervorgerufen wurde. Als Folgen des Klimawandels werden beispielsweise Biodiversitätsverlust, humanitäre Katastrophen und die Steigerung von Extremwetterereignissen angeführt, die durch anthropogene Aktivitäten wie zum Beispiel der Emission von Treibhausgasen und der Rodung von Waldflächen neben vielen anderen weiter verschlimmert werden (vgl. ebd., S. 49-53). Um einen möglichen Maßnahmenkatalog zu entwerfen, der die Vorschläge des IPCC (2015, S. 96, 101) wie der Senkung von Treibhausgasemissionen durch Aufforstung und dem generellen nachhaltigen Umgang mit Georessourcen nachkommt, damit eine Adaption an den Klimawandel oder besser noch eine Mitigation der treibenden Faktoren möglich wird, ist das Monitoring dieser Ressourcen nötig (vgl. Tang et al. 2016, S. 1f.). Dazu zählen auch Vegetationsflächen in Stadtgebieten, welche den Kernfokus dieses Projektes bilden (vgl. Davies et al. 2011, S. 1126).

Vegetationsflächen in Stadtgebieten tragen viele verschiedene soziale, ökonomische und vor allem ökologische Funktionen in sich (vgl. Tang et al. 2016, S. 1). Besonders wichtig ist ihre Funktion als Kohlenstoffsinken, bei der Kohlenstoff durch den Photosyntheseprozess aus der Luft gefiltert und in der Biomasse gebunden wird (vgl. Eneji et al. 2014, S. 158). Dadurch kommt ihnen in Anbetracht des Klimawandels eine besondere Rolle zu, denn sie können einen Teil der Treibhausgasemissionen, vor allem die prominentesten Vertreter Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>), binden (vgl. Davies et al. 2011, S. 1126).

Eine Fragestellung ist dabei, inwieweit die Vegetationen eines Stadtgebietes in der Lage sind, die Treibhausgasemissionen dessen zu kompensieren. Sie zielt auf einen Teilbereich der Mitigation treibender Faktoren des Klimawandels hin, nämlich der nachhaltigen Nutzung verfügbarer Flächen und der Kompensation von Treibhausgasemissionen durch ökologisch orientierte Maßnahmen (vgl. IPCC 2015, S. 101). Diese Fragestellung bildet die Grundlage dieses Projektes. Sie kann dabei in drei wesentliche Teile unterteilt werden: zum einen in das Erfassen der Vegetationen eines Stadtgebietes, der Klassifizierung, zum anderen in die Berechnung der Kompensationsfähigkeit der Vegetationsflächen, der Kalkulation, sowie als drittes in den Vergleich der Kompensationsfähigkeit mit den Emissionsdaten des Stadtgebietes, der Bilanzierung. Unser Projekt soll ermöglichen, dass zu einem beliebigen Zeitpunkt aufgenommene Satellitenbilder einer beliebigen Region automatisiert ausgewertet, Vegetationsflächen in ihnen klassifiziert und Kompensationsfähigkeiten berechnet werden, um diese anschließend mit Emissionsdaten der Region zu bilanzieren. Dadurch soll eine Aussage darüber getroffen werden können, ob die Vegetationsflächen die Emissionen kompensieren können. Dies kann kommunal bei der Mitigation weiterer Auswirkungen des Klimawandels helfen, indem im Anschluss des Projektes zum Beispiel neue Flächen zur Aufforstung ausgewiesen oder zusätzlich die Emissionsherde genauer betrachtet werden, um andere Gegenmaßnahmen zu planen (vgl. Davies et al. 2011, S. 1125, 1131f.).

## 2. Methodenüberblick

Zur Beantwortung der Fragestellung gibt es verschiedene Methoden, die sich anbieten. Für den ersten Teil, der Klassifizierung, sollte eine Unterscheidung in Vegetations- und vegetationsfreie Flächen erfolgen. Dies kann laut Aryal et al. (2022, S. 3f.) mit zwei möglichen Methoden erreicht werden: mit der Index-basierten und mit der machine-learning-basierten Klassifizierung. Bei der machine-learning-basierten Klassifizierung werden komplizierte Algorithmen wie Random Forest oder Support Vector Machine genutzt, um kontrollierte (supervised) und unkontrollierte (unsupervised) Klassifizierungen durchzuführen. Dabei werden den Algorithmen entweder voreingestellte Klassen zur Verfügung gestellt (supervised) oder die Klassen während des Prozessierens von den Algorithmen selbst erstellt (unsupervised). Diese Methoden sind meist weniger einsichtig in ihren Berechnungen und dadurch zur einfachen Replizierbarkeit in dem Kontext dieses Projektes ungeeignet. Da sehr stark kontrolliert werden soll wie

klassifiziert wird und auch eine gewisse Flexibilität der Berechnungen gegeben sein soll, wurde die index-basierte Klassifizierung gewählt. Bei dieser wird ein Index errechnet und in selbst spezifizierte Kategorien eingeteilt. Welcher Index gewählt wird hängt stark von der Thematik und dem zu betrachtenden Bodenobjekt ab.

## 2.1 NDVI & NDVI-Thresholds

Abbildung 1 zeigt die idealtypischen Spektralreflektionen verschiedener Bodenobjekte im Bezug zu den Wellenbereichen des sichtbaren Lichts und längeren Wellenlängen. Es ist gut zu erkennen, dass abseits des sichtbaren Lichtes wesentlich mehr Informationen in den Objekten gelagert werden, die nur durch Multispektralität zu erfassen sind. Aus den markanten Verläufen der verschiedenen Objekte kann auf multispektralen Aufnahmen erkannt werden, um welche Objekte es sich handelt. Für die Fragestellung des Projekts ist die Unterscheidung zwischen Vegetationen und Nicht-Vegetationen interessant. Möglich wird diese durch den Umstand, dass aktive Vegetation im roten Wellenlängenbereich bei Wellenlängen um die 668 Nanometer stark absorbiert, aber im Nahen Infrarotbereich (NIR) um die 840 Nanometer stark reflektiert. Dies ist in den Verläufen der Spektralreflektionen einzigartig und unterscheidet Vegetation stark von Böden, Gewässern und Gebäuden (vgl. Jensen 2007, S. 363f.).

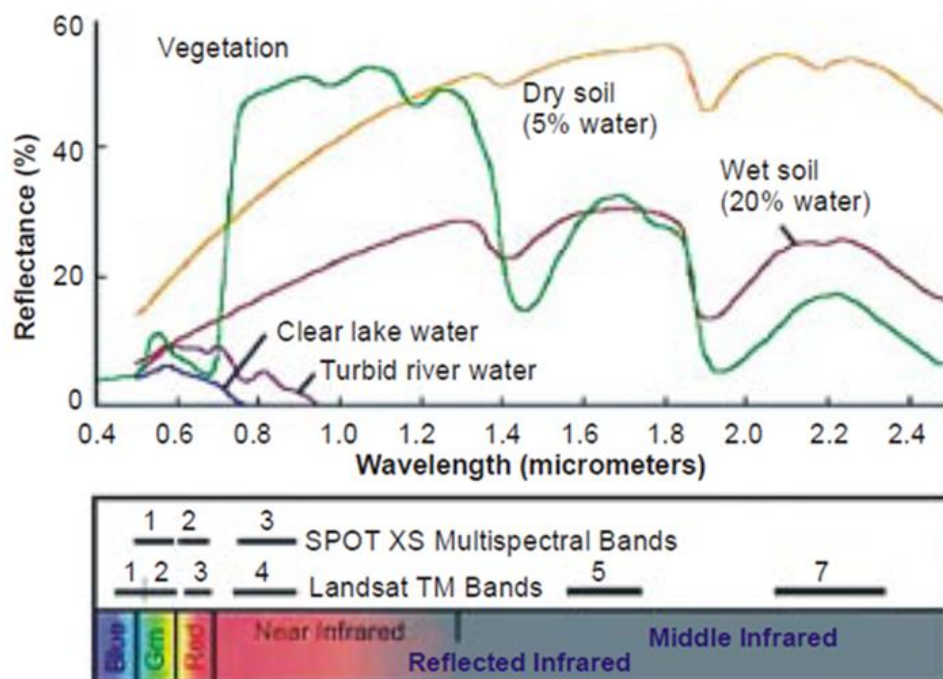


Abbildung 1: Spektralreflexionen verschiedener Bodenobjekte (Mkansi 2017)

Grund dafür ist die Photosynthese, denn für diesen Prozess benötigen die Pflanzenblätter

Sonnenlicht. Chloroplasten in den Blättern absorbieren dabei das Licht des blauen und roten Bereiches und reflektieren einen Teil des Lichts im grünen Bereich, wodurch die Blätter grün erscheinen. Die Zellwände innerhalb der Blätter streuen einen Großteil des Lichts im NIR, da es mit Chlorophyll kaum interagiert. Dadurch ist der Reflektionswert von gesunder aktiver Vegetation im NIR-Bereich sehr hoch (vgl. Gross 2005, S. 2). Auf Basis dieses Umstandes wurde ein Index entwickelt, genannt Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), der durch eine einfache Rechnung die Vegetationsvitalität bestimmen kann:

$$NDVI = \frac{NIR - Rot}{NIR + Rot}$$

(verändert nach Rouse et al. 1973, o.S.)

Dabei werden die beiden markanten Bereiche im roten und NIR-Wellenlängenbereich genutzt, um einen Wertebereich zwischen -1 und 1 zu berechnen, der Auskunft darüber gibt, wie photosynthetisch aktiv die Vegetation ist. Daraus ist auf die Vitalität einer Pflanze zu schließen (vgl. Jensen 2007, S. 361f.; Konecny 2014, S. 135). Natürlich ist auch die Berechnung anderer Indizes möglich, doch Da Silva et al. (2020, S. 9) zeigen klar, dass für die Landnutzungskartierung und -klassifizierung der NDVI unter den analysierten Indizes zu den Besten gehört und recht einfach in GIS umzusetzen ist. Daher wird er für dieses Projekt verwendet.

Aryal et al. (2022, S. 9), Candiago et al. (2015, S. 4029), Hashim et al. (2019, S. 239) und Gross (2005, S. 3) beschreiben, dass dieser NDVI-Wertebereich mittels sogenannten „NDVI-Thresholds“ in Kategorien zur besseren Klassifizierung in verschiedene Vegetationsarten beziehungsweise Stadien des Vegetationswachstums eingeteilt werden kann. Dabei geben sie unterschiedliche Wertebereiche für die einzelnen Kategorien an, was darauf hindeutet, dass es hierbei keine klare Definition gibt. Sie haben gemeinsam, dass negative Werte bis Null auf eine Abwesenheit von Vegetation hinweisen, da diese Werte im Grunde aussagen, dass das Objekt photosynthetisch inaktiv ist. Auch niedrige Werte von 0-0,19 deuten auf sehr schwache photosynthetische Aktivität hin, woraus zu schließen ist, dass auch diese Objekte wahrscheinlich keine Vegetation abbilden. Ab diesem Punkt unterscheiden sich die Angaben in der Literatur.

Aryal et al. (2022, S. 9) und Hashim et al. (2019, S. 239) teilen den Bereich von 0,2-1 weiter in die beiden Klassen 0,2-0,5 und 0,5-1 ein, die sie mit „Shrub“ und „Trees“ beziehungsweise „low vegetation“ und „high vegetation“ betiteln. Candiago et al. (2015, S. 4029) geben leicht

andere Werte für die gleichen Klassen an (0,2-0,3 „shrub and grassland“ und 0,4-0,9 „forests and crops“). Gross (2005, S. 3) entschied sich sogar für vier Klassen: 0,2-0,3 „shrub and grassland“, 0,6-0,8 „temperate and tropical rainforests“ sowie 0,4-0,6 und 0,9-1 ohne Bezeichnungen. Später gibt er die Klassen mit „sparse“ bis „heavy vegetation“ an, was sich teilweise mit Hashim et al. deckt. Andere Literaturen geben nochmal andere Wertebereiche an, wodurch wir in diesem Projekt gezwungen sind, eine eigene Einteilung vorzunehmen. Daher wurde sich durch Kombination der Literatur für insgesamt vier Bereiche entschieden, welche auch in der später im Modell benutzten Reklassifikationsmatrix (siehe *Tab. 1*) angegeben sind.

*Tabelle 1: Reklassifikationsmatrix (eigene Darstellung)*

Wertebereich	Zugewiesene Klasse	Bedeutung
-1,01 – 0,2	1	Keine Vegetation
0,2 – 0,4	2	Geringe Vegetation (Sträucher/Gras)
0,4 – 0,6	3	Mittlere Vegetation (Agrarprodukte)
0,6 – 1,01	4	Höhere Vegetation (Wald/Bäume)

Aufgrund der genannten fehlenden Definition der Wertebereiche ist davon auszugehen, dass diese Einteilung lediglich ungefähre Ergebnisse liefern kann. Es reicht allerdings für den Zweck aus, den dieses Projekt verfolgt, nämlich der groben Einschätzung des Verhältnisses zwischen gesamter Kompensationsfähigkeit und gesamten Emissionen.

## 2.2 Kalkulation & Bilanzierung

Sind die Vegetationsflächen klassifiziert, müssen diese im zweiten Schritt, der Kalkulation, in Kompensationsfähigkeiten umgerechnet werden. Dazu werden vor allem die oben genannten Unterklassen benötigt. Werte aus der Literatur, die Kompensationsfähigkeiten bestimmter Pflanzengruppen oder Nutzungsarten wie Agrar- und Waldflächen angeben, werden nach der Berechnung und Reklassifizierung des NDVI mit den Klassen verrechnet und extrapoliert. Dadurch können jeweils Werte für jede Klasse berechnet werden, die als klassengebundene Kompensationsfähigkeiten in das Modell integriert werden können (vgl. Davies et al. 2011, S. 1128f.; Eneji et al. 2014, S. 160ff.). Auch hier ist die Flexibilität der Klassen wichtig, da die Wertebereiche teilweise an die in der Literatur genannten Werte angepasst werden müssen.



Diese Werte werden anschließend im dritten Schritt mit Emissionswerten der gewählten Region bilanziert. Dadurch wird am Ende ein Wert ausgegeben, der die Antwort darauf gibt, ob die Vegetationsflächen die Emissionen kompensieren können (vgl. Tang et al. 2016, S. 4f.). Für jeden der genannten Schritte sind unterschiedliche Daten und Berechnungen nötig. Welche das sind und wie sie in ein automatisiertes Modell implementiert werden können wird im nächsten Kapitel näher beleuchtet.

### 3. Daten & Methodik

Die Umsetzung der Methodik, sprich der Klassifizierung, Kalkulation und Bilanzierung, in einen automatisierten Prozess wurde zur Veranschaulichung in einem Workflow (siehe Abb. 2) visualisiert. Dieser beginnt links ausgehend mit der Beschaffung der Raster- und Vektordaten, der „Data Acquisition“. Die Daten werden anschließend im Schritt „QGIS\_Model“ in ein Modell überführt, welches die wesentliche Automatisierung der Methodik darstellt. Mithilfe des Modells werden die Daten einer ausgewählten Region für die Berechnung des NDVI vorbereitet, verrechnet und anschließend mittels der „NDVI-Thresholds“ in bestimmte Vegetationsklassen reklassifiziert. Daran anschließend werden unter dem Punkt „Calculation“ auf Literaturwerten basierende Kompensationswerte („Sequestration values“) für die jeweiligen Vegetationsklassen berechnet und unter dem Punkt „Comparison of Values“ in einem eigens dafür angefertigten Excel-Sheet eingetragen und mit CO<sub>2</sub>-Emissionswerten zwecks Bilanzierung verrechnet.

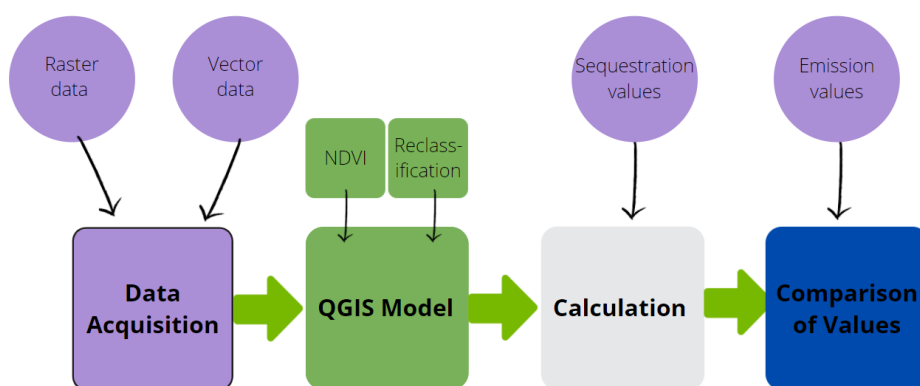


Abbildung 2: Workflow vereinfacht (eigene Darstellung)

#### 3.1 Data Acquisition

Da der Klimawandel ein globales Phänomen ist, welches aber viele regionale Probleme mit sich bringt, ist es für eine solche automatisierte Analyse wichtig, dass sie auf verschiedene

Regionen anwendbar ist. Das heißt für die Automatisierung, dass auch die Daten und mögliche Kennwerte möglichst global vorliegen müssen und die Möglichkeit gegeben sein muss, dass sie sowohl generalisiert als auch spezialisiert werden können. Dennoch ist es ratsam, die Methodik auf kleineren festgesetzten Testgebieten zu testen. Dabei sollte das Testgebiet im Bestfall eine kleine Großstadt sein, die ein gutes Verhältnis zwischen urbanen und vegetativen Flächen aufweist, damit die Berechnungszeit nicht allzu lang ausfällt, die Fläche aber groß genug ist, um diversifiziertere, komplexere Flächenkonstellationen zu beinhalten. Aus diesem Grund wurde die Stadt Heidelberg ausgewählt. Diese besticht durch ihre großen Vegetations- und recht komprimierten urbanen Flächen und bietet sich auch aufgrund der physischen Nähe gut an.

Die Automatisierung erfolgt mithilfe des Graphical Modelers, weshalb die Installation der aktuellsten Version des Open-Source GIS QGIS Desktop mit dem zusätzlichen Plugin SAGA notwendig ist<sup>1</sup>. Zur Beantwortung der einleitend formulierten Fragestellung werden hochauflösende Rasterdaten, mithilfe derer die Berechnung des NDVI möglich ist, Vektordaten, welche Verwaltungseinheiten wie beispielsweise Städte berücksichtigen, um Vegetationsflächen auf ein selektiertes Wunschareal zu begrenzen sowie gemittelte Treibhausgas-Kompensationsdaten für die jeweiligen Vegetationsklassen und zu den Vektordaten passende CO<sub>2</sub>-Emissionsdaten benötigt.

### 3.1.1 Räumliche Daten: Raster

Bei der Suche nach Rasterdaten für die Klassifizierung von Vegetationsflächen mittels NDVI muss man sich aufgrund der Verfügbarkeit mehrerer Optionen gemäß seinen Anforderungen an die Daten für einen speziellen Datensatz entscheiden. Der für unsere Fragestellung benötigte Datensatz sollte frei zugänglich und kostenlos sein, dabei dennoch eine möglichst hohe Auflösung in den benötigten Spektralbändern bieten. Wie auch bei Aryal et al. (2022, S. 1) fiel die Wahl eines geeigneten Datensatzes wegen seiner hohen Auflösung in den für die Berechnung des NDVI benötigten Bändern vier und acht (Rot und NIR) auf den über den ESA (2022) zugänglichen Sentinel-2A-Datensatz. Nach Registrierung und erfolgreichen Anmeldung ist eine intuitive Auswahl von Daten für einen gewünschten Bereich zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Vergangenheit, welcher im Idealfall identisch mit dem Datensatz der CO<sub>2</sub>-

---

<sup>1</sup> Während der Ausarbeitung des Reports waren die jeweils aktuellsten Versionen QGIS 3.22 und SAGA 7.8.2-14

Emissionsdaten ist, möglich. Hierbei sollte beachtet werden, dass ein hoher Bedeckungsgrad durch Wolken die Güte des Datensatzes bei der Berechnung des NDVI verringert, weshalb empfohlen wird den Bedeckungsgrad im Filter auf 0 bis 10% zu limitieren (vgl. Aryal et al. 2022, S. 34).

### 3.1.2 Räumliche Daten: Vektor

Die Vektordaten werden idealerweise bereitgestellt durch die Website GADM (2022), über die Vektordaten aller Staaten der Welt heruntergeladen und frei genutzt werden können, die in mehreren administrativen Ebenen strukturiert sind und sowohl als Geopackage als auch als Shapefile angeboten werden. Dazu zählen auch entsprechend der Fragestellung Stadtgebiete unter anderem von Deutschland, was für die Eingrenzung des Testgebietes auf Heidelberg vonnöten ist. Zusätzliche Informationen wie Einwohnerzahl und Zugehörigkeit zu höheren administrativen Ebenen können für die Analyse vorerst nicht verwendet werden, sind aber für eine intensivere Auseinandersetzung mit der Thematik sicherlich sinnvoll.

### 3.1.3 Kompensations- und Emissionsdaten

Für den dritten und vierten Schritt des Workflows, der Kalkulation und der anschließenden Bilanzierung, werden Literaturwerte benötigt, die die Kompensationsfähigkeit bestimmter Vegetationen aufzeigen, und die zu kompensierenden Emissionsdaten. Kompensationsdaten wurden auf Grundlage von Schätzungen in Publikationen wie Eneji et al. (2013, S. 159) und Tang et al. (2016, S. 5f.) und der Kampagne „Natürlich CO<sub>2</sub> binden“ (Lehner Maschinenbau GmbH 2021) zusammengeführt und jeweils die minimalste, maximalste und eine durchschnittliche Kompensationsfähigkeit für die vier Vegetationsklassen berechnet (siehe Tab. 2).

*Tabelle 2: Kompensationsfähigkeiten (eigene Darstellung)*

<b>Kompensationsfähigkeiten (Tonnen CO<sub>2</sub> / Hektar / Jahr)</b>			
<b>Vegetationsklasse</b>	<b>Minimal</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Maximal</b>
1	0,00	1,00	2,00
2	3,50	6,00	8,50
3	3,50	12,25	21,00
4	6,53	11,14	15,75

Eine Datenbank mit Emissionswerten für alle Treibhausgase auf verschiedenen administrativen Stufen, welche mit denen aus dem Vektordatensatz übereinstimmen, war im Rahmen der Recherchen für diese Arbeit nicht aufzufinden. Da auch die Datenlage der Kompensationsfähigkeiten vor allem auf die Sequestrierung von Kohlenstoff abzielt und weniger auf bestimmte Treibhausgase, wurde versucht nach den beiden prominentesten Treibhausgasen CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>, die beiden einen hohen Kohlenstoffanteil haben und den Großteil der Treibhausgasemissionen ausmachen, zu suchen. Dabei konnte lediglich für die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit [openghghmap.net](https://www.openghghmap.net) (2022) ein geeigneter Datensatz mit Emissionswerten für einzelne administrative Einheiten ausgemacht werden. Im Rahmen eines Forschungsprojektes 2018 wurden offizielle CO<sub>2</sub>-Emissionsdaten von Eurostat mithilfe von OpenStreetMap kartiert und nach Herkunft (Verkehr, Industrie etc.) klassifiziert (vgl. Moran et al. 2022, S. 874f.). Diese Daten werden auf der Webseite interaktiv angeboten, wodurch die Verarbeitung der Daten recht einfach ausfällt. Allerdings existieren aufgrund des Forschungsumfangs nur Daten für Europa und der aktuellste Wert für Heidelberg ist nicht einsehbar, da die Daten im Rahmen des Projektes lediglich im Jahr 2018 aufgenommen und publiziert wurden. Da die Vorteile der Anwendung aber überwiegen und für die Modellierung der Automatisierung inklusive Testung ausreichen, wird der dort angegebene Wert von 472.689 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr für die Analyse benutzt und die restlichen Daten entsprechend angepasst.

### 3.2 QGIS-Modell

Sind die entsprechenden Daten besorgt und ihre Qualität überprüft, wird wie im Workflow (siehe *Abb. 2*) gezeigt das QGIS Modell (siehe *Abb. 3*) aufgerufen, um den Hauptteil der Analyse, die Berechnung und Reklassifizierung des NDVI, durchzuführen. Das Modell baut auf dem Methodenablauf von Hashim et al. (2019, S. 238) auf und ist in vier wesentliche Bereiche aufgebaut: dem Einstellen der Inputs, dem Preprocessing, der NDVI-Kalkulation und -Reklassifizierung sowie der Generierung von Outputs, die der weiteren Verarbeitung der berechneten Werte dienen sollen. Zudem wurde ein weiterer optionaler Block mit Tests zur Berechnung des NDVI implementiert, die in *Kapitel 5* näher erläutert werden.

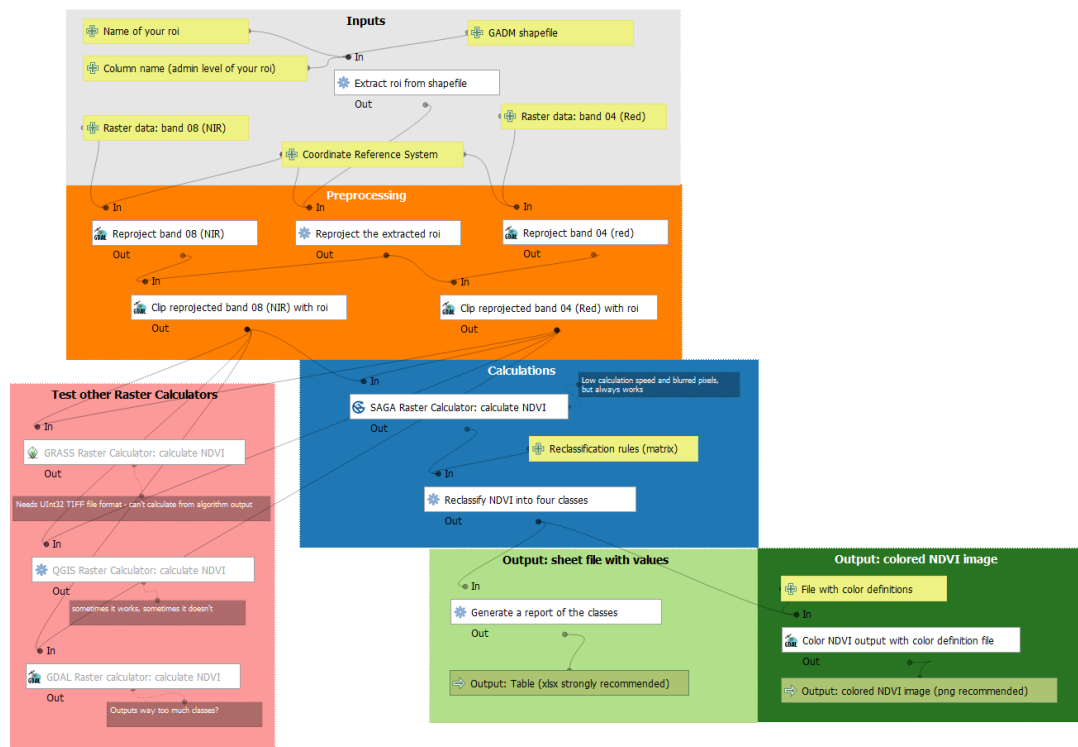


Abbildung 3: QGIS-Modell (eigene Darstellung, größer skaliert in Abbildung 12 im Anhang)

Die Inputs bestehen in erster Linie aus den heruntergeladenen Vektor- und Rasterdaten und Eingaben durch den\*die Nutzer\*in. In *Abbildung 4* wird das Eingabefenster in QGIS mit den entsprechenden Parametern gezeigt. Zuerst wird eine Abfrage innerhalb der Vektordatei („GADM shapefile“) gestartet, die eine Region („Name of your roi“) mittels „Extract by attribute“-Tool markiert und extrahiert. In diesem Beispiel ist die zu analysierende Region die Stadt „Heidelberg“, die in den GADM-Vektordaten vor allem in der dritten administrativen Ebene („NAME\_3“) dargestellt wird. Die Extraktion dieser Region aus den Vektordaten soll dazu dienen, dass die Rasterdaten in einem nächsten Schritt mit dieser extrahierten Region verschnitten und dadurch Rechenzeiten und Datengrößen minimiert werden.

Bevor dieser Schritt jedoch eingeleitet wird, werden alle Daten im Schritt „Preprocessing“ mit den „Reproject Layer“- und „Warp (Reproject)“-Tools auf ein gemeinsames, durch den\*die Nutzer\*in eingestelltes Koordinatensystem, auf Grundlage der Inputdaten in diesem Fall „EPSG:25832“, reprojiziert. Damit wird gewährleistet, dass keine Koordinatensystemproblematiken, wie in QGIS (2022) beschrieben, auftreten. Es kann nämlich passieren, dass Daten aus unterschiedlichen Quellen in verschiedenen Koordinatensystemen projiziert sind und bei Verarbeitung ohne Definition eines gemeinsamen Koordinatensystems die Genauigkeiten abnehmen oder die Berechnungen sogar völlig falsche Ergebnisse liefern. Um dem

entgegenzuwirken ist eine Reprojektion vor der Verarbeitung der Daten nötig. Anschließend wird die Verschneidung der beiden Rasterbänder („Raster data: band 04“ und „Raster data: band 08“) mit der extrahierten Region mithilfe des „Clip raster by mask layer“-Tools durchgeführt. Wie im Modell zu sehen werden die Schritte dabei für beide Bänder der Satellitendaten angewandt, da sie für weitere Berechnungen deckungsgleich sein sollten.

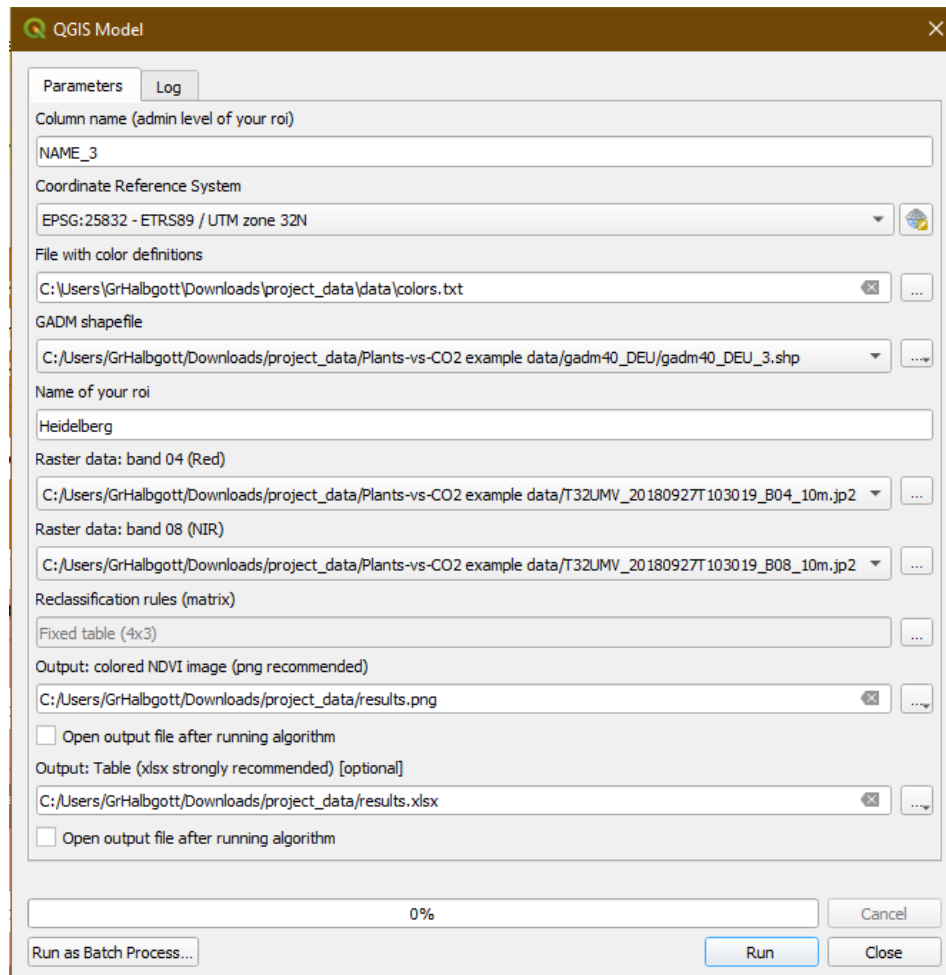


Abbildung 4: Eingabefenster des QGIS-Modells (eigene Darstellung)

Sind die Daten durch das Preprocessing vorbereitet, kann im Grunde schon der Vegetationsindex berechnet werden. Der „Raster Calculator“ dient zum Be- und Umrechnen von Rasterdaten und bietet die Möglichkeit beliebige Formeln zu implementieren. Wie oben beschrieben ist für das Projekt der NDVI nach Rouse et al. (1973, o.S.) interessant und wird daher in dieser Form in den Raster Calculator eingesetzt. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass die Ergebnisse der Modelalgorithmen (Reprojektion & Verschneidung) als Inputparameter benutzt werden, denn erst dadurch wird eine vollständige Automatisierung des Modells möglich. Warum im Modell der Raster Calculator von SAGA benutzt wurde, wird in *Kapitel 5* näher erläutert.

Ist der NDVI berechnet, soll er entsprechend der Fragestellung in Klassen eingeteilt werden. Dazu wird das Tool „Reclassify by table“ benutzt, denn hier kann eine Reklassifikationsmatrix (siehe *Tab. 1*) eingespeist werden, nach der reklassifiziert werden soll (supervised classification). Ein ähnliches Verfahren haben auch Hashim et al. (2019, S. 238f.) verwendet. Die Matrix definiert die Wertebereiche der einzelnen Klassen und gibt anschließend eine Attributtabelle aus, die die absolute Pixelmenge pro Klasse angibt. Dabei kann auch die Art angegeben werden, nach der die Wertegrenzen behandelt werden sollen. Sinnvoll ist in diesem Fall die Einstellung „ $\min \leq \text{NDVI} < \max$ “, denn so werden alle Werte des kompletten Bereiches miteingeschlossen und den Klassen so zugeteilt, dass sie genau an den Wertegrenzen zur nächsten jeweiligen Klasse eingeteilt werden.

Um die Daten für die Berechnung der Kompensationsfähigkeiten verwenden zu können, werden abschließend zwei Arten von Outputs generiert. Zum einen der Export der Attributtabelle durch das Tool „Raster layer unique values export“, welches die Werte wie sie nach der Reklassifizierung vorliegen als Exceldatei ausgibt. Da die Sentinel-2A-Satellitenbilder eine Auflösung von 10x10 Metern haben, entspricht die absolute Pixelmenge dabei den Gesamt-Ar der einzelnen Klassen. Dieser Umstand ermöglicht das einfache Umrechnen der Werte in Hektar durch das Teilen durch 100, welche sich für die späteren Kompensationsberechnungen wesentlich besser eignen.

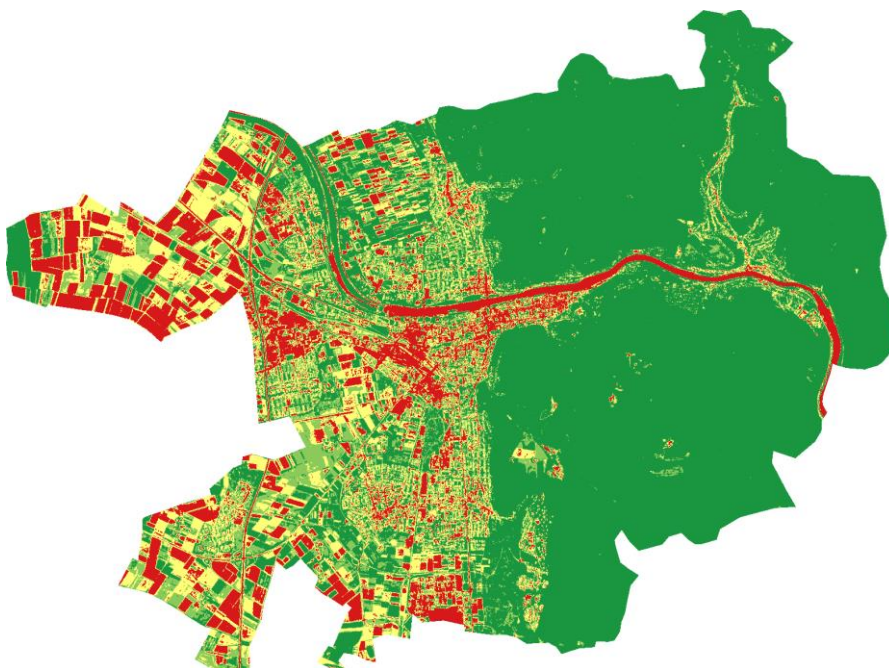


Abbildung 5: Farbig codierter reklassifizierter NDVI der Stadt Heidelberg. Dunkelgrün = hohe Vegetation ( $\text{NDVI} \geq 0.6$ ), hellgrün = mittlere Vegetation ( $0.4 \leq \text{NDVI} \leq 0.599$ ), gelb = niedere Vegetation ( $0.2 \leq \text{NDVI} \leq 0.399$ ) und rot = keine Vegetation ( $\text{NDVI} \leq 0.199$ ) (eigene Darstellung)

Zum anderen wird ein farbiges „Color Relief“ (gleichnamiges Tool) ausgegeben, welches als Hilfsmittel dienen soll, die Qualität der NDVI-Kalkulation und -Reklassifizierung zu beurteilen und mögliche Probleme visuell besser zu erkennen (siehe *Abb. 5*). Dazu werden die reklassifizierten NDVI-Werte mithilfe einer Farbdefinitionsdatei (siehe *Tab. 3*) kontrolliert den Klassen nach eingefärbt. Der Parameter „Matching Mode“ kann dazu benutzt werden, Farbverläufe zwischen den Klassen zu ermöglichen oder den Klassen feste Farben zuzuweisen. Die Farbdefinitionsdatei wurde so erstellt, dass sie zwischen den Klassen 2 und 4 einen interpolierten Farbverlauf ermöglicht. Dies ist für die Anzahl der vorliegenden Klassen irrelevant, allerdings kann diese Datei für Fälle mit wesentlich mehr Klassen einfach umgeschrieben und angewandt werden. Da das Ziel des Projektes ein möglichst breiter Einsatzzweck ist, bei dem die Qualität der Berechnungen durch Steigerung der Qualität der Inputs verbessert werden kann, erscheint dies als sinnvoller zusätzlicher Schritt.

*Tabelle 3: Inhalt der Farbdefinitionsdatei für das Tool „Color Relief“ (eigene Darstellung).*

<b>Vegetationsklasse</b>	<b>Rot</b>	<b>Grün</b>	<b>Blau</b>	<b>Alpha</b>
-9999	255	255	255	0
1	215	25	28	100
2	255	255	120	100
4	26	150	65	100

### 3.3 Postprocessing/Kalkulation

Die *Abbildungen 6-8* stellen das Excel-Sheet zur Verrechnung der vier eingeteilten NDVI-Vegetationsklassen mit den jeweiligen CO<sub>2</sub>-Kompensationswerten aus der Literatur zwecks Bilanzierung und Beantwortung der zu Beginn formulierten Frage graphisch dar.

		<b>Total area of specified classes of your roi</b>	
<b>Class</b>	<b>Level of vegetation</b>	<b>HERE (m<sup>2</sup>)</b>	<b>ha (m<sup>2</sup> / 10.000)</b>
1	no vegetation (-1.01 - 0.2)		0,00
2	shrub/grass (0.2 - 0.4)		0,00
3	crops (0.4 - 0.6)		0,00
4	forest (0.6 - 1.01)		0,00

*Abbildung 6: Excelsheet (leer) mit Angaben zu den vier Vegetationsklassen und einer Spalte für Ergebnisse der NDVI-Analyse (eigene Darstellung)*



In *Abbildung 6* werden jeweils für die vier unterteilten Vegetationsklassen „no vegetation“, „shrubs/grass“, „crops“ und „forest“ (siehe Spalte „Level of vegetation“) die durch den NDVI ermittelten Vegetationsflächen in Quadratmetern, sowie in Hektar aufgeführt. Die blau hinterlegte Fläche innerhalb des Blocks „Total area of specified classes of your roi“ gilt den mittels NDVI errechneten und im Anschluss reklassifizierten Vegetationsflächen in Quadratmetern, welche zwecks Vereinheitlichung für die weitere Berechnung in Hektar umgerechnet werden.

Sequestration ability (t CO <sub>2</sub> / ha / year)			Total sequestration ability (t CO <sub>2</sub> / year)		
min	mean	max	min	mean	max
0,00	1,00	2,00	0,00	0,00	0,00
3,50	6,00	8,50	0,00	0,00	0,00
3,50	12,25	21,00	0,00	0,00	0,00
6,53	11,14	15,75	0,00	0,00	0,00

*Abbildung 7: Excelsheet (leer) mit Angaben zu Kompensationswerten für die jeweiligen Klassen (links) und für die verrechneten Kompensationsfähigkeitswerte (rechts) (eigene Darstellung)*

Der Block „Sequestration ability“ listet die minimalen (min), gemittelten (mean) und höchsten (max) Kompensationswerte der jeweiligen Vegetationsklassen gemäß Eneji et al. (2013, S. 159), Tang et al. (2016, S. 5f.) und der Lehner Maschinenbau GmbH (2021) in t CO<sub>2</sub>/ha/Jahr auf. Liegen die ermittelten NDVI-Flächen nun vor, werden diese in Hektar umgerechneten Flächen nun jeweils mit den min-, mean-, max-Kompensationsfähigkeitswerten multipliziert und als Produkte in Tonnen CO<sub>2</sub>/Jahr jeweils für min, mean und max für die „Total sequestration ability“ eingetragen.

Total sequestration ability of roi (t CO <sub>2</sub> / year)		
min	mean	max
0,00	0,00	0,00
Emission value (t CO <sub>2</sub> / year)		
Balance (emission - sequestration)		
min	mean	max
0,00	0,00	0,00
Green means the vegetation <b>is able</b> to compensate all CO <sub>2</sub> emissions of your roi.		
Red means the vegetation <b>is not able</b> to compensate all CO <sub>2</sub> emissions of your roi.		

*Abbildung 8: Excelsheet (leer) für die Summen der Kompensationsfähigkeitswerte, der Emissionswerte für die Region und der Bilanz (eigene Darstellung)*

In *Abbildung 8* werden die absoluten Kompensationswerte der jeweiligen Vegetationsklassen des untersuchten Gebiets miteinander addiert und jeweils unter dem Punkt „Total sequestration ability of roi“ unter min, mean und max zusammengefasst. Unter „Emission value“ wird nun der durch die *openghghmap.net* bereitgestellte CO<sub>2</sub>-Emissionswert für den ausgewählten Bereich eingetragen und anschließend eine Differenz zwischen diesem und den summierten Kompensationswerten für den ausgewählten Bereich gebildet. Im Falle positiver Ergebnisse reicht die Kompensation durch die Vegetation nicht aus, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu kompensieren und das Ergebnisfeld der Bilanzierung wird rot unterlegt. Reicht die Kompensation durch die Vegetation allerdings aus, um die Emissionen auszugleichen, so liegen negative Werte vor und das Feld wird grün hinterlegt.

## 4. Ergebnisse/Bilanzierung

Am Beispiel der Stadt Heidelberg sieht man in den *Abbildungen 9-11* die Ergebnisse der Bilanzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und der CO<sub>2</sub>-Kompensation durch die verschiedenen Klassen.

Class	Level of vegetation	Total area of specified classes of your roi	
		HERE (m <sup>2</sup> )	ha (m <sup>2</sup> / 10.000)
1	no vegetation (-1.01 - 0.2)	13347000	1.334,70
2	shrub/grass (0.2 - 0.4)	16446500	1.644,65
3	crops (0.4 - 0.6)	15017900	1.501,79
4	forest (0.6 - 1.01)	65216800	6.521,68

*Abbildung 9: Excelsheet mit Angaben und Werten für Heidelberg zu den vier Vegetationsklassen und einer Spalte für Ergebnisse der NDVI-Analyse (eigene Darstellung)*

Wie man *Abbildung 9* entnehmen kann, fallen von allen durch den NDVI klassifizierten Oberflächen 12,13 % auf „no vegetation“, 14,95 % auf „shrub/gras“, 13,65 % auf „crops“ und ganze 59,27 % auf „forest“ zurück. Somit liegt für die Stadt ein recht hoher Anteil an Vegetationen, vor allem im Bereich der Wälder, vor.

Sequestration ability (t CO <sub>2</sub> / ha / year)			Total sequestration ability (t CO <sub>2</sub> / year)		
min	mean	max	min	mean	max
0,00	1,00	2,00	0,00	1.334,70	2.669,40
3,50	6,00	8,50	5.756,28	9.867,90	13.979,53
3,50	12,25	21,00	5.256,27	18.396,93	31.537,59
6,53	11,14	15,75	42.593,09	72.654,78	102.716,46

*Abbildung 10: Excelsheet mit Angaben und Werten für Heidelberg zu Kompensationswerten für die jeweiligen Klassen (links) und für die verrechneten Kompensationsfähigkeitswerte (rechts) (eigene Darstellung)*

Nach Verrechnung der jeweiligen Klassen-Kompensationsfähigkeiten mit den klassifizierten Oberflächen kann Abbildung 10 entnommen werden, dass beim Vergleich der Klassen hinsichtlich des insgesamt kompensierten CO<sub>2</sub> die Klasse „no vegetation“ 1,3%, die Klasse „shrub/gras“ 9,7 %, die Klasse „crops“ 18 % und die Klasse „forest“ 71,05 % ausmacht. Das hohe Ergebnis bei der Klasse Wald kommt zum einen durch den generell hohen Anteil des Waldes bei der Klassifizierung, zum anderen durch auch die unter anderem durch Eneji et al. (2013, S. 159) beschriebene hohe Kompensationskapazität der Wälder zustande.

Total sequestration ability of roi (t CO <sub>2</sub> / year)		
min	mean	max
53.605,63	102.254,30	150.902,98
Emission value (t CO <sub>2</sub> / year)		
472.689		
Balance (emission - sequestration)		
min	mean	max
419.083,37	370.434,70	321.786,02
Green means the vegetation <u>is able</u> to compensate all CO <sub>2</sub> emissions of your roi.		
Red means the vegetation <u>is not able</u> to compensate all CO <sub>2</sub> emissions of your roi.		

Abbildung 10: Excelsheet mit Werten für Heidelberg für die Summen der Kompensationsfähigkeitswerte, der Emissionswerte für die Region und der Bilanz (eigene Darstellung)

Abbildung 11 zeigt, dass mindestens 53.605 t CO<sub>2</sub>/Jahr, im Mittel 102.254,30 t CO<sub>2</sub>/Jahr und maximal 150.902,98 t CO<sub>2</sub>/Jahr kompensiert werden. Auf der Gegenseite stehen 472.689 t CO<sub>2</sub>-Emissionen/Jahr, womit die Kompensation durch die ermittelten Flächen im Minimum 11,3 %, im Mittel 21,6 % und maximal 31,9 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen/Jahr kompensieren kann. Es ist demnach festzuhalten, dass trotz einer nicht irrelevanten Kompensation die Kompensationsfähigkeit der klassifizierten Flächen in diesem Fall nicht ausreicht, um die Emissionen zu auszugleichen. Andere wissenschaftliche Arbeiten mit einer ähnlichen Fragestellung machten dieses Ergebnis bereits erwartbar. So sprechen Velasco et al. (2016, S. 14) der urbanen Begrünung in ihrer Arbeit zwar einige positive Eigenschaften zu, bewerten die Rolle der urbanen Vegetationen hinsichtlich der Sequestrierung von CO<sub>2</sub>, wie auch Tang et al. (2016, S. 4f.), aber als marginal und sagen deshalb, dass eine forcierte urbane Begrünung für die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung als Mitigationsmittel gegen den Klimawandel nicht ausreicht.

## 5. Diskussion

Die Fragestellung, inwieweit die Vegetationen eines Stadtgebietes in der Lage sind, die Treibhausgasemissionen dessen zu kompensieren, gepaart mit der Automatisierung der Auswertung von Rasterdaten und der anschließenden Kalkulation der Kompensationsfähigkeit, ist in der Literatur kaum wiederzufinden (vgl. Velasco et al. 2014, S. 14). Viele beschäftigen sich entweder mit dem einen Teil, der Methode der NDVI-Thresholds (vgl. Aryal et al. 2022; Hashim et al. 2019), oder dem anderen Teil, der Schätzung von Kompensationsfähigkeiten bestimmter Vegetationsgruppen in bestimmten Regionen (vgl. Eneji et al. 2013; Tang et al. 2016). Aber eine Kombination beider Methoden mit der gleichen Intensität und Wissenschaftlichkeit scheint ein sehr großes Unterfangen zu sein, was auch sicherlich den Rahmen der Projektarbeit sprengen würde. Daher wurden vereinfachte Datensätze und simplere Methoden gesucht und gefunden, welche eine Automatisierung der Methodiken und grobe Aussagen über das Verhältnis zwischen Vegetationsflächen und Emissionen begünstigen. Dies scheint auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse gelungen zu sein.

Bei der Wahl geeigneter Rasterdaten für die Berechnung des NDVI kamen der Landsat-8- sowie der Sentinel-2A-Datensatz in Frage. Die Entscheidung fiel aufgrund der höheren räumlichen Auflösung von 10 Metern im Vergleich zu 30 Metern in den relevanten Bändern Rot und NIR auf den Sentinel-2A Datensatz (vgl. NASA 2022). Isioye et al. (2020, S. 70) verglichen Landsat-8 mit Sentinel-2A-Daten im Rahmen einer Vegetationsklassifizierung unter Verwendung des NDVI und attestierten dem Sentinel-Datensatz bei Betrachtung ihrer Ergebnisse aufgrund der um 20 Meter höheren Auflösung ebenfalls ein durchschnittlich besseres Ergebnis.

Der Emissionsdatensatz für CO<sub>2</sub> von [openghgmap.net](https://openghgmap.net), basierend auf dem Forschungsprojekt von Moran et al. (2022), liefert unter Bezugnahme umfangreicher Emissionsdaten von Tankstellen, Fahrzeugen, Gebäuden etc. eine umfassende Übersicht. Dennoch handelt es sich hierbei lediglich um Schätzdaten auf Grundlage großer Datenmengen, die gewissen Limitierungen und Unsicherheiten unterliegen. Gemäß den Autoren sorgt beispielsweise eine mögliche Unvollständigkeit des OpenStreetMap-Datensatzes für eine mögliche Über- bzw. Unterschätzung von Tankstellen und Verkehr, den beiden größten Emittenten, in bestimmten Regionen. Ferner simplifizieren Moran et al. (2022, S. 849) durch die Annahme europaweit homogener Tankstellen mit der quantitativ jeweils gleichen Zuweisung von Fahrzeugen, nehmen demnach also eine einheitliche Relevanz hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emission für jede Tankstelle an.

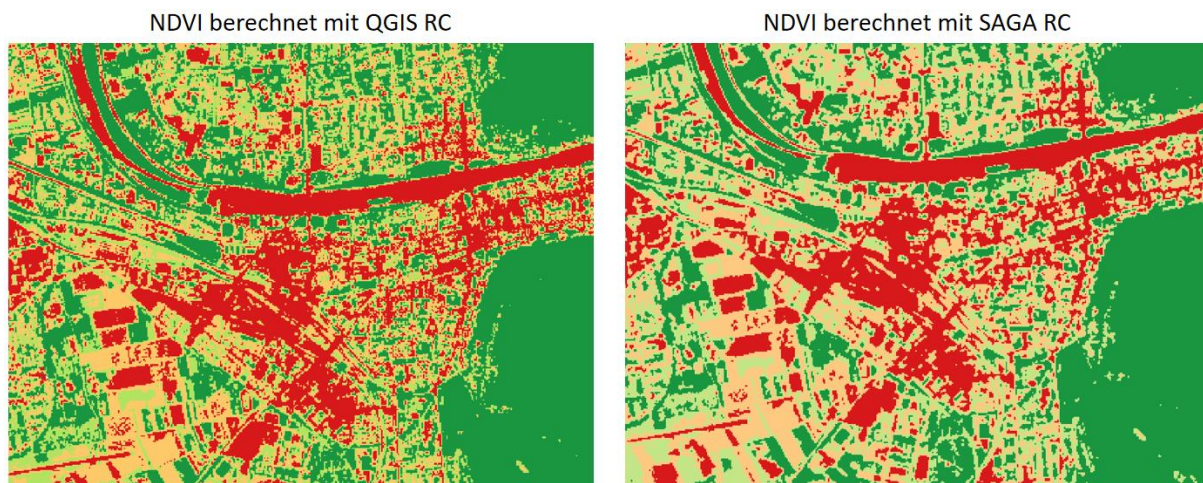
Eine ähnliche Problematik herrscht auch bei den Kompensationsdaten. Die Werte, wie sie für die Analyse verwendet werden (siehe *Tab. 2*), sind nicht exakt wissenschaftlich belegbar. Die Erfassung der Kompensationsfähigkeit einzelner Bäume ist kaum messbar, die meisten Werte basieren auf Schätzungen und Berechnungen auf Grundlage von geschätztem Gewicht, Baumart, chemischen Massen und anderen Faktoren (vgl. Eneji et al. 2013, S. 159). Zudem sind Vegetationen auch alleine über das Jahr schon sehr divers, wodurch Kompensationsfähigkeiten teils stark variieren können. Wie auch in Tang et al. (2016, S. 2) und Velasco et al. (2016, S. 14) müssen also Mittelwerte benutzt werden, um grobe Schätzungen zu erreichen.

Hinzu kommt, wie in Osterburg/Don (2021, S. 65f.) beschrieben, dass Vegetationen vor allem auf Agrarflächen in ihrem Lebenszyklus zwar große Mengen an Kohlenstoff binden können, dieser Kohlenstoff aber bei der Nahrungsmittelproduktion indirekt durch den Verzehr wieder zu einem großen Teil freigesetzt wird. Dadurch handelt sich hierbei nicht um eine langfristige Kohlenstoffbindung, sondern nur um „durchlaufende Posten“ (Osterburg/Don 2021, S. 65), also temporäre Kohlenstoffbindungspotentiale. In der Debatte um den Klimawandel können Agrarflächen daher eigentlich nicht als Kompensationsflächen angesehen werden. Dies beeinträchtigt die Ergebnisse der Analyse beträchtlich und erklärt, warum die Kombination beider Methodiken in der Literatur kaum wiederzufinden ist. Beide Datensätze, Emission wie Kompensation, liefern zusammen allerdings eine gute Schätzung des Verhältnisses zwischen Kompensationsfähigkeit und gemessenen Emissionen, wodurch sie sich unter dem Strich gut für das Projekt eignen.

Das Modell scheint die Methodik des NDVI-Thresholds gut zu automatisieren, wie auch in der kolorierten NDVI-Grafik (siehe *Abb. 5*) zu sehen ist. Im Gegensatz zu ausgeschriebenen Scripts hat das Modell den Vorteil, dass die vielen verschiedenen Input-Daten anwender\*innenfreundlicher eingegeben werden können und die Automatisierung durch die Visualisierung des Modells im Graphical Modeler optisch ergänzt wird, was Anwender\*innen beim Verständnis des Prozessablaufs helfen kann. Zusätzlich ist es dadurch einfacher, die Analyse regionsunabhängig und anpassbar an vorhandene Daten zu gestalten, da weder Namen von Datensätzen noch bestimmte Datentypen vorausgesetzt werden. Dadurch wird die Zielsetzung des Projektes besser unterstützt.

Es ist dahingehend zu optimieren, dass herausgefunden werden sollte, ob ein anderer Raster Calculator (RC) besser für die Anwendung geeignet wäre. Dies wurde im Block „Test other

Raster Calculators“ bereits mit drei weiteren Kalkulatoren getestet, allerdings kam es bei allen dreien zu Problemen bei der Implementierung in das Modell, welches entsprechend angepasst werden musste. Der Raster Calculator von QGIS auf GDAL-Basis hatte zwischenzeitlich sehr gut funktioniert und die Geschwindigkeit der Analyse um die Hälfte reduziert, allerdings hatte dieser zu Problemen bei Tester\*innen geführt, weswegen er schließlich durch den RC von SAGA GIS ersetzt wurde. Dieser benötigt zwar länger, rechnet dafür aber zuverlässiger. Ein weiterer Kritikpunkt ist ebenfalls, dass beim Vergleich der beiden kolorierten NDVI-Graphiken nach Ausführung des Modells wie in *Abbildung 11* zu sehen sichtbar wird, dass die Pixel beim SAGA RC verschwommen wirken. Dies kann der Konvertierung in SAGA-Datentypen geschuldet sein, die nach Berechnung des NDVI wieder in QGIS-fähige Datentypen rückkonvertiert werden. Das erklärt auch die längere Rechenzeit, wobei diese auch auf die benutzen Algorithmen der verschiedenen GIS zurückgeführt werden könnten, was allerdings nicht näher spezifiziert werden kann. Durch diesen Umstand werden auch andere Ergebnisse bei der Kalkulation der Kompensationsfähigkeiten erzielt, allerdings sind die Unterschiede so minimal und das Verhältnis zwischen Kompensation und Emission so groß, dass dieses Problem keine Auswirkungen auf das Ergebnis hat.



*Abbildung 11: Vergleich der Raster Calculators (eigene Darstellung)*

Darüber hinaus ist es im zeitlichen Rahmen des Seminars nicht möglich geworden, eine automatisierte Übertragung der Ergebnisse des Modells in das vorgefertigte Excel-Sheet zu erreichen. Ebenfalls ist es kaum möglich, die je nach Region benötigten Rasterdaten automatisch zur Verfügung zu stellen, da die Daten aufgrund von Wolkenbedeckung teilweise stark in der Qualität variieren und die Analyse mit nicht begutachteten Daten eingeschränkt sein kann. Deshalb ist eine vollständige Automatisierung der Analyse zu diesem Zeitpunkt weder möglich



noch gewünscht.

Trotzdem trägt die funktionierende „Semi-Automatisierung“ der Verarbeitung der entsprechenden Datensätze dazu bei, dass die Zielsetzung, dass eine Bilanz für eine selbstgewählte Region gezogen werden kann und darauf basierend weitere Maßnahmen getroffen werden, erreicht wird. Es kann aber festgehalten werden, dass das Modell aufgrund der Limitierungen hinsichtlich der Daten lediglich eine erste Einschätzung beziehungsweise einen generellen Überblick über die Gegebenheiten bezüglich der CO<sub>2</sub>-Bilanz einer beliebigen Region liefert und mangels empirischer Daten keine „wahren“ Aussagen über die CO<sub>2</sub>-Bilanz einer Stadt treffen kann. Die Kernaussage der Analyse, also dass die Vegetationen eines Stadtgebietes, selbst wenn sie die Hälfte der Stadtfläche ausmachen, definitiv nicht zur Kompensation normaler urbaner Emissionen reichen, kann in Debatten um den Klimawandel als Unterstützung der Argumente, die dort angeführt werden, hinzugezogen werden (vgl. Tang et al. 2016, S. 5; Velasco et al. 2016, S. 14). Genau das ist das Einsatzgebiet dieser Analyse und genau für diesen Einsatz funktioniert sie unseres Erachtens sehr gut.

Optimiert werden könnte die Analyse durch zwei Punkte. Zum einen durch Steigerung der Qualität der Daten, zum Beispiel durch eine intensivere Literaturrecherche und durch Definition der Vegetationen, die mit einbezogen werden sollten. Zum anderen könnte das Ergebnis auf die Jahreszeiten angepasst werden, indem angenommen wird, dass die Jahresemissionen über die Jahreszeiten hinweg gleichbleibend sind und auf die Quartale aufgeteilt werden können. Durch Berechnung der Kompensationsfähigkeiten nur für eine bestimmte Jahreszeit kann dann der gewählte Zeitpunkt der Rasterdaten besser im Ergebnis widerspiegelt werden. Es ist anzunehmen, dass die Kompensationsfähigkeiten im Winter wesentlich niedriger sind als im Sommer, sodass die Wahl der Rasterdaten im Sommer, wie sie bei der momentanen Analyse angewandt wurden, die tatsächlich höchsten Werte ausgibt und die wirkliche Kompensationsfähigkeit im Jahr nochmal um einige Größenordnungen niedriger ausfällt. Eine Alternative zum Modell stellt das SCP-Plugin von QGIS dar (Congedo 2021), welches halbautomatisiert eine kontrollierte indexbasierte Analyse von Rasterdaten ermöglicht. Allerdings bietet dies gerade im Hinblick auf die weiteren Analysen und die Fragestellung keinen Mehrwert. Daher scheint die benutzte Methode im Rahmen des Projektes gute Ergebnisse zu erzielen und kann öffentlich bei anderen Analysen eingesetzt werden, um eine erste grobe Einschätzung der Verhältnisse zwischen Vegetationen und Emissionen zu erhalten, um im Hinblick auf den

Klimawandel mögliche weitere Maßnahmen zu entwickeln.

## 6. Fazit

Auf Grundlage genannter Ergebnisse kann ausgesagt werden, dass das Projekt im Bezug zur Fragestellung und Zielsetzung erfolgreich abgeschlossen wurde. Die genutzten Daten unterliegen signifikanten Limitierungen, weshalb die Ergebnisse dieser Automatisierung selbstverständlich keine empirische Aussagekraft aufweisen können. Sie dienen deshalb im Wesentlichen zur Veranschaulichung eines Sachverhalts und sollen lediglich einen ersten Überblick über die mögliche CO<sub>2</sub>-Kompensation durch Vegetation mithilfe automatisierter Satellitenbilddauswertungen liefern. Die in der Einleitung geführte Fragestellung, ob CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Stadtgebietes durch die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung von Vegetationen dessen kompensiert werden können, wurde dahingehend beantwortet, dass die alleinige Sequestrierung durch Vegetationen innerhalb des Stadtgebietes nicht ausreicht, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu kompensieren. Dieses Ergebnis entspricht auch anderen Arbeiten mit ähnlichen Fragestellungen, wobei die in dieser Arbeit verwendete Methode recht hohe Kompensationswerte annimmt und deshalb mit hoher Wahrscheinlichkeit die Kompensationsleistung der klassifizierten Oberflächen noch überschätzt. Dem Projekt kann trotzdem durchaus ein großes Potential zugesprochen werden, da es so konzipiert ist, dass es mit besseren Daten, sprich einer höheren räumlichen Auflösung der Rasterdaten, zuverlässigen Emissionswerten und genaueren Kompensationswerten auch zuverlässigere Ergebnisse liefert, die beispielsweise im Rahmen des eingangs erwähnten notwendigen Monitorings von Ressourcen zwecks Mitigation des und Adaption an den Klimawandel nützlich sein könnten.

Das Projekt hat beide Autoren das Interesse an geoinformatischen Thematiken steigern lassen und einen großen Lerneffekt in der Automatisierung von geoinformatischen Analysen zur Folge gehabt. Über einen Zeitraum von drei Monaten wurde die Analyse soweit optimiert, dass sie öffentlich eingesetzt werden kann. Auf Grundlage bereits genannter Optimierungsvorschläge ist geplant das Projekt auch über das Seminar hinaus weiter zu entwickeln. Weitere Informationen und eine Anleitung zum Replizieren der Analyse finden sich auf GitHub unter <https://github.com/GrHalbgott/Plants-vs-CO2>. Falls der Link nicht mehr funktionieren sollte, bitte bei [gr.halbgott53@web.de](mailto:gr.halbgott53@web.de) melden, wir versuchen dann das aktuellste Repository zur Verfügung zu stellen.



## Literaturverzeichnis

- Aryal, J./Sitaula, C./Aryal, S. (2022): NDVI Threshold-Based Urban Green Space Mapping from Sentinel-2A at the Local Governmental Area (LGA) Level of Victoria, Australia. - In: Land, 11:351, o.S.
- Candiago, S./Remondino, F./De Giglio, M./Dubbini, M./Gattelli, M. (2015): Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. - In: Remote Sensing, 7, S. 4026 - 4047.
- Churkina, G. (2016): The Role of Urbanization in the Global Carbon Cycle. - In: Frontiers in Ecology and Evolution, 3:144, o.S.
- Congedo, L. (2021): Semi-Automatic Classification Plugin. A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. - In: Journal of Open Source Software, 6(64), S. 3172-3178.
- ESA [European Space Agency] (2022): Copernicus Open Access Hub. - URL: <https://scihub.copernicus.eu/> [26.03.2022].
- Da Silva, V.S./Salami, G./Oliveira da Silva, M.I./Araujo Silva, E./Montiero, J.J./Alba, E. (2020): Methodological evaluation of vegetation indexes in land use and land cover (LULC) classification. - In: Geology, Ecology and Landscapes, 4(2), o.S.
- Davies, Z.G./Edmondson, J.L./Heinemeyer, A./Leake, J.R./Gaston, K.J. (2011): Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. - In: Journal of Applied Ecology, 48, S. 1125-1134.
- El-Gammal, M.I./Ali, R.R./Abou Samra, R.M. (2014): NDVI Threshold Classification for Detecting Vegetation Cover in Damietta Governorate, Egypt. - In: Journal of American Science, 10(8), S. 108-113.
- Eneji, I.S./Obinna, O./Azua, E.T. (2014): Sequestration and Carbon Storage Potential of Tropical Forest Reserve and Tree Species Located within Benue State of Nigeria. - In: Journal of Geoscience and Environment Protection, 2, S. 157-166.
- GADM (2022): Download GADM data (version 4.0). - URL: [https://gadm.org/download\\_country.html](https://gadm.org/download_country.html) [26.03.2022].

Gross, D. (2005): Monitoring Agricultural Biomass Using NDVI Time Series. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rom, Italien.

Jensen, J.R. (2007): Remote Sensing of the Environment. An Earth Resource Perspective. Second Edition. Pearson Education, Noida, Neu Delhi, Indien.

Konecny, G. (2014): Geoinformation. Remote Sensing, Photogrammetry, and Geographic Information Systems. Second Edition. CRC Press, Boca Raton, Vereinigte Staaten von Amerika.

Hashim, H./Latif, Z.A./Adnan, N.A. (2019): Urban Vegetation Classification with NDVI Threshold Value Method with Very High Resolution (VHR) Pleiades Imagery. - In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42(4), S. 237-240.

IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change] (2015): Climate Change 2014. Synthesis Report. Genf, Schweiz.

Isioye, O./Akomolafe, E./Awulu, J. (2020): Geospatial analysis of Impervious Surfaces and their Effect on Land Surface Temperatur in Abuja, Nigeria. - In: International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 44-3/W1-2020.

Lehner Maschinenbau GmbH (2021): Die Kampagne. Natürlich CO<sub>2</sub> binden. - URL: <https://www.co2-acker.de/kampagne> [26.03.2022].

Mkansi, R. (2017): Spectral reflectance of soil, vegetation and water. - URL: <https://mkansi-reminder.wordpress.com/2017/04/24/spectral-reflectance-of-soil-vegetation-water/> [28.07.2021].

Moran, D./Pichler, P.-P./Zheng, H./Muri, H./Klenner, J./Kramel, D./Többen, J./Weisz, H./Wiedmann, T./Wyckmans, A./Strømman, A.H./Gurney, K.R. (2022): Estimating CO<sub>2</sub> emissions for 108 000 European cities. - In: Earth System Science Data, 14, S. 845-864.

NASA [National Aeronautics and Space Administration] (2022): Landsat 8. - URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/> [26.03.2022]

Osterburg, B./Don, a. (2021): Nur die langfristige CO<sub>2</sub>-Bindung zählt. - In: Panorama Klimaschutz, DLG-Mitteilungen, 5, S. 64-66.

QGIS (2022): Coordinate Reference Systems. - URL: [https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/gentle\\_gis\\_introduction/coordinate\\_reference\\_systems.html](https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/gentle_gis_introduction/coordinate_reference_systems.html) [23.03.2022].

OpenGHGmap.net (2022): European OpenGHGmap. - URL: <https://openghgmap.net/> [26.03.2022].

Rouse, J.W./ Haas, R.H./Schell, J.A./Deering, D.W. (1973): Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. - In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351, 1, S. 309 - 317.

Tang, Y./Chen, A./Zhao, S. (2016): Carbon Storage and Sequestration of Urban Street Trees in Beijing, China. - In: Froniers in Ecology and Evolution, 4:53, o.S.

Velasco, E./Roth, M./Norford, L./Molina, L. (2016): Does urban vegetation enhance carbon sequestration. - In: Landscape and Urban Planning, 148, S. 99-107.

Weier, J./Herring, D. (2000): Measuring Vegetation (NDVI & EVI). - URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation> [16.03.2022].

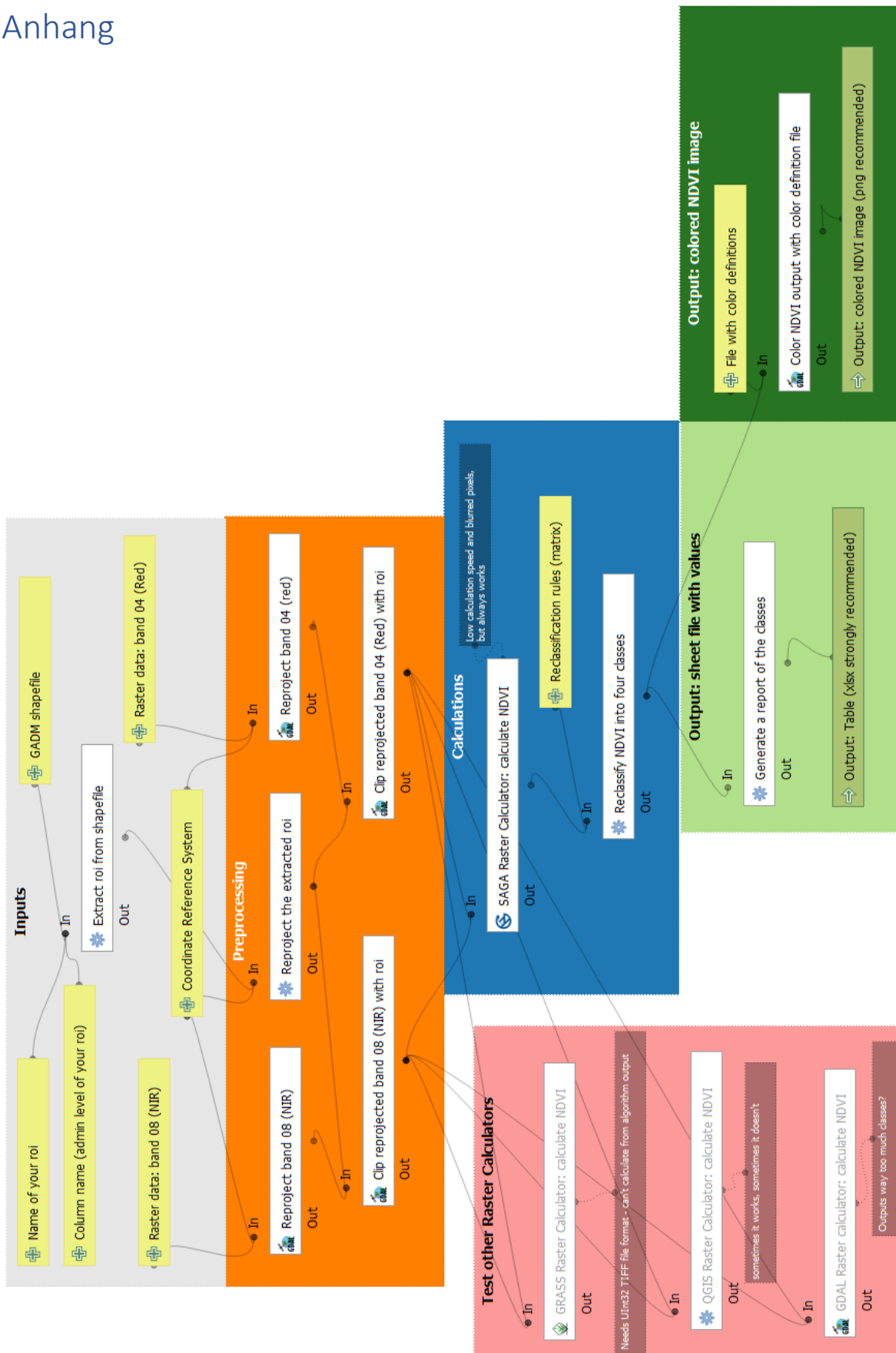


Abbildung 12: QGIS-Modell größer skaliert (eigene Darstellung)

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erklären wir an Eides statt, dass wir diese Projektarbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken als solche kenntlich gemacht haben. Die Arbeit wurde bisher keinem anderen Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt und nicht veröffentlicht.

Heidelberg, den 29.03.2022

gez. Nikolaos Kolaxidis & Tobias Romes