



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

**PLUS – Planning of Landscape  
and Urban Systems, IRL**

ETH Zürich  
Studiengang Umweltwissenschaften  
Potential von Agroforstsystemen zur Erreichung  
der „Umweltziele Landwirtschaft“. Eine GIS-ba-  
sierte MCDA für den Kanton Zürich.

Christoph Graf von Pfeil  
Matr. Nr. 12-938-890  
Telefon +41 78 639 77 67  
E-Mail christoph.pfeil@hotmail.com

## Masterarbeit



# Potential von Agroforstsystemen zur Erreichung der „Umweltziele Landwirtschaft“.

Eine GIS-basierte MCDA für den Kanton Zürich.

<b>Datum</b>	16. März 2020
<b>Autor</b>	Christoph Graf von Pfeil
<b>Betreuung</b>	Dr. Enrico Celio
<b>Leitung</b>	Prof. Dr. Adrienne Grêt-Regamey
<b>Externe Referentinnen</b>	Sonja Kay und Johanna Rüegg

## ***Danksagung***

Ich möchte mich bei Prof. Dr. Adrienne Grêt-Regamey für die Möglichkeit bedanken, die Masterarbeit am Lehrstuhl für Planung von Landschaft und Urbanen Systemen – PLUS schreiben zu können.

Ich möchte mich auch besonders bei meinem Betreuer Dr. Enrico Celio für die kompetente Betreuung bedanken. Die regelmässigen Meetings, in denen wir die Neuerungen, die aufgetretenen Schwierigkeiten und die Ziele besprochen haben, waren eine wertvolle Unterstützung.

Mein Dank gilt auch den Experten, die zu der Umsetzung meiner Methodik beigetragen haben. Ganz besonders möchte ich Sonja Kay erwähnen, die mir einen Einblick in die Fachwelt der Agroforstwirtschaft gewährt hat. Sonja Kay hat mir ermöglicht, Kontakte zu Agroforstwissenschaftlern und –praktikern zu knüpfen und einen Einblick in ein umgesetztes Agroforstsystem zu bekommen.

Danken möchte ich auch Johanna Rüegg für den fachlichen Beistand zu Agroforstsystemen und Dr. Maarten Van Strien für die Unterstützung mit dem R-Skript.

Zuletzt gilt mein Dank auch noch meiner Familie, meinen Freunden und meiner Partnerin Aurelia, für die Unterstützung, den Rückhalt und das aufgebrachte Verständnis während dieser Zeit. Im Besonderen möchte ich meinen Eltern danken, die mir die Ausbildung an der ETH ermöglicht haben.

## Zusammenfassung

Die Ausrichtung der Landwirtschaft in der Schweiz zeigt mit der Agrarpolitik ab 2022 eine Veränderung in Richtung umweltschonende und nachhaltige Landwirtschaft, ressourceneffiziente und -schonende Produktion, standortangepasste Bewirtschaftung und multifunktionale Landwirtschaft auf. Der Statusbericht der „Umweltziele Landwirtschaft“ (UZL) 2016 zeigt, dass viele Ziele, die sich die Landwirtschaft stellt, noch nicht erreicht sind. Agroforstsysteme (AFS) weisen eine Reihe von Ökosystemleistungen auf und können durch die Multifunktionalität zur Erreichung der Ziele beitragen.

Mit einer GIS-basierten MCDA wird das Potential von AFS zur Erreichung der UZL für den Kanton Zürich quantifiziert. Dazu wurden Kriterien entwickelt, die auf den Leistungen der AFS beruhen und sich an den Teilzielen der UZL orientieren. Die Kriterien wurden mit Experten gewichtet, um die Relevanz der Kriterien für die Landwirtschaft mit einfließen lassen zu können. Die Layer zu den Kriterien wurden mit den Softwares ArcGIS und R bearbeitet, überlagert und den landwirtschaftlichen Nutzflächen im Kanton Zürich zugeordnet.

Die Resultate zeigen das Potential von AFS zur Erreichung der UZL auf Parzellenebene. Anhand der Karten wird deutlich, wo das grösste Potential von AFS konkret liegt. Die Ergebnisse zeigen auch, dass auf 6894 Parzellen, die rund 5% der landwirtschaftlichen Nutzflächen des Kantons Zürich ausmachen, neun oder mehr Umweltdefizite und Umweltverbesserungen überlagern. AFS können demnach einen bedeutenden Beitrag zur Erreichung der UZL leisten.

# Inhalt

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Material und Methoden</b>	<b>3</b>
2.1. Literaturrecherche	3
2.2. Grundlagedaten	3
2.3. Aufbereitung der Layer	4
2.3.1. Deckungsgrad der Bienen	5
2.3.2. Ästhetik	5
2.3.3. Zugang der Parzelle zur Erholung	6
2.3.4. Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft	6
2.3.5. Feinstaub Immission (PM10) und Stickoxid Immission (NO <sub>2</sub> )	7
2.3.6. Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer, Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer und Wasserverfügbarkeit für Pflanzen	7
2.3.7. Standortbelastung	7
2.4. Multi-criteria decision analysis (MCDA)	7
2.4.1. Multi-objective decision making (MODM)	8
2.5. Herleitung und Utilityfunctions der Kriterien	9
2.5.1. Wildtierkorridore	9
2.5.2. Deckungsgrad der Biene	9
2.5.3. Biodiversität	10
2.5.4. Ästhetik	10
2.5.5. Zugang der Parzelle zur Erholung	11
2.5.6. Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft	11
2.5.7. Feinstaub Immission (PM10)	11
2.5.8. Stickoxid Immission (NO <sub>2</sub> )	12
2.5.9. Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer	13
2.5.10. Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer	14
2.5.11. Bodeneigenschaften	15
2.5.12. Standortbelastung	16
2.5.13. Wasserverfügbarkeit für Pflanzen	17
2.6. Sensitivitätsanalyse	18
2.6.1. Sensitivität des Rankings	18
2.6.2. Sensitivität der Gewichtung	19
2.6.3. Sensitivität der Utilityfunctions	19
2.6.4. Sensitivität zum Ausschluss eines stark korrelierenden Kriteriums	19
2.6.5. Sensitivität zur Utilityfunction der Bodeneigenschaften	20
<b>3. Resultate</b>	<b>21</b>
3.1. Literaturrecherche	21
3.1.1. Definition Agroforstsystem	21
3.1.2. Klassifizierung von Agroforstsystemen	21
3.1.3. Ökosystemleistungen von Agroforstsystemen	22
3.1.4. Konzept zur Einteilung der Kriterien	22

3.2. Multi-Objektive-Entscheidungen .....	24
3.2.1. Ranking der Kriterien .....	24
3.3. Potential von Agroforstsystemen zur Verbesserung der „Umweltziele Landwirtschaft“ .....	25
3.4. Anzahl Umweltdefizite und Umweltverbesserungen pro Parzelle.....	27
3.5. Sensitivitätsanalyse .....	30
3.5.1. Sensitivität des Rankings .....	30
3.5.2. Sensitivität der Gewichtung.....	33
3.5.3. Sensitivität der Utilityfunctions .....	36
3.5.4. Sensitivität zum Ausschluss eines stark korrelierenden Kriteriums .....	39
3.5.5. Vergleich der Sensitivitätsanalysen.....	42
3.5.6. Sensitivität zur Utilityfunction der Bodeneigenschaften .....	42
<b>4. Diskussion.....</b>	<b>45</b>
4.1. Forschungsfrage.....	45
4.2. Eignung von Agroforstsystemen .....	45
4.3. Gewichtung und Ranking.....	45
4.4. Utilityfunction der Kriterien.....	46
4.5. Potential von Agroforstsystemen zur Erreichung der „Umweltziele Landwirtschaft“ ....	47
4.6. Vergleich mit den Resultaten von Kay et al. (2019b) .....	47
4.7. Validität .....	47
4.8. Wie werden die Potentialflächen bewirtschaftet? .....	48
4.9. Sensitivitätsanalyse .....	49
4.10. Trade off.....	49
<b>5. Ausblick.....</b>	<b>50</b>
5.1. Weiterführung der Masterarbeit .....	50
5.2. Begrenzung auf landwirtschaftliche Nutzflächen.....	50
5.3. Nächste Schritte .....	50
<b>6. Literatur .....</b>	<b>51</b>
<b>7. Anhang .....</b>	<b>57</b>
7.1. R-Skript .....	57
7.2. Korrelation der Kriterien.....	57
7.3. Rangordnung der Kriterien aus Experteninterviews .....	58
7.4. Resultate .....	59
7.4.1. Tabellen der 1000 Parzellen mit den grössten Potentialwerten.....	59
7.4.2. Tabellen der 6894 Parzellen mit den grössten Potentialwerten.....	60
7.4.3. Tabellen zu den Parzellen mit den meisten UD und UV.....	61
7.5. Vergleich der Umweltdefizite aus Kay et al. (2019b) und der 13 Kriterien der Masterarbeit .....	62

# Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

## Tabellen

Tabelle 1: Die Kriterien werden mit ihren verwendeten Grundlagedaten aus dem GIS-Browser des Bundes und des Kantons Zürich sowie den Daten aus der Vorlesung „Multi-Criteria Decision Analysis“ der ETH dargestellt. Die Layer der Grundlagedaten werden mit der Bezeichnung und der Art/Auflösung beschrieben. ....	4
Tabelle 2: Dargestellt ist die Berechnung der Werte für das Kriterium Ästhetik. Diese erfolgt über die Bewertung (high = 0.333, medium = 0.166, low = 0.083) der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung aufgrund der drei Eigenschaften. Das Potential zur Verbesserung der „Umweltziele Landwirtschaft“ durch Agroforstsysteme ergibt sich aus der Differenz zwischen dem maximal möglichen Ästhetik-Wert (1) und dem ermittelten Wert (Ästhetik-Wert). ....	5
Tabelle 3: Die Aufbereitung der Daten zur Ermittlung des Werts der Erreichbarkeit der landwirtschaftlichen Parzelle. Für das Spaziertempo wurde eine Geschwindigkeit von 3 km/h angenommen. ....	6
Tabelle 4: Liste der konsultierten Experten und ihrem Arbeitsfeld. ....	9
Tabelle 5: Die Utilityfunktion der Bodeneigenschaft wird aus der landwirtschaftlichen Nutzungseignung (LNE) der Parzelle abgeleitet. Neben den konkreten LNE werden Parzellen, die nicht klar klassifiziert werden können, vom Kanton in Bereiche eingeteilt. Das Potential der Bereiche wird aus dem gemittelten Wert aller im Bereich liegenden Nutzungseignungen errechnet. ....	16
Tabelle 6: Die Utilityfunktion der Bodeneigenschaften und die Veränderung der Utilityfunktion der Bodeneigenschaften im Vergleich. ....	20
Tabelle 7: Häufigkeit des zugeteilten Rangs der Experten-Rangordnung. Das Zeichen $\Theta$ stellt den berechneten Wert zum Rang dar. Zusätzlich wird der Rang der Kriterien aufgeführt. ....	24
Tabelle 8: Dargestellt sind die Werte der Kriterien mit den höchsten Korrelationskoeffizienten. ....	57
Tabelle 9: Rangordnung der Kriterien: Die Zahlen entsprechen dem Gewichtungscodex und stehen jeweils für ein Kriterium: Bodeneigenschaften = 1, Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer = 2, Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer = 3, Standortbelastung = 4, Wasserverfügbarkeit für Pflanzen = 5, Wildtierkorridore = 6, Biodiversität = 7, Deckungsgrad der Bienen = 8, Ästhetik = 9, Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft = 10, Zugang der Parzelle zur Erholung = 11, Feinstaub Immission (PM10) = 12, Stickoxid Immission (NO2) = 13. ....	58
Tabelle 10: Die Nutzungseignungen der 1000 Parzellen mit den höchsten Potentialwerten. ....	59
Tabelle 11: Der Diffuse Stickstoffeintrag in Gewässer sowie die Wasserverfügbarkeit und Biodiversität zu den 1000 Parzellen mit den höchsten Potentialwerten. ....	59
Tabelle 12: Die Nutzungseignungen der 6894 Parzellen mit den höchsten Potentialwerten. ....	60
Tabelle 13: Der Diffuse Stickstoffeintrag in Gewässer, die Wasserverfügbarkeit und Biodiversität der 6894 Parzellen mit höchsten Potentialwerten. ....	60
Tabelle 14: Die Nutzungseignungen der Parzellen mit den meisten Überlagerungen. ....	61
Tabelle 15: Der Diffuse Stickstoffeintrag in Gewässer, die Wasserverfügbarkeit und Biodiversität der 6894 Parzellen, welche die meisten Überlagerungen aufweisen. ....	61
Tabelle 16: Der Vergleich der Umweltdefizite aus der Publikation von Kay et al. (2019b) und den Kriterien der Masterarbeit. ....	62

## Abbildungen

Abbildung 1: Die Utilityfunktion für die Feinstaub Immission (PM10) wird durch den Grenzwert von 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und eine linear steigende Funktion nach dessen Überschreitung beschrieben. Alle Werte, die unterhalb des Grenzwerts liegen werden gleich 0 gesetzt. Alle Werte oberhalb 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ erhalten den Maximalwert 1. ....	12
Abbildung 2: Die Utilityfunktion für die Stickoxid Immission (NO <sub>2</sub> ) wird durch den Grenzwert von 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und eine linear steigende Funktion nach dessen Überschreitung beschrieben. Alle Werte, die unterhalb des Grenzwerts liegen, werden gleich 0 gesetzt. Alle Werte oberhalb 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ erhalten den Maximalwert 1. ....	13
Abbildung 3: Die Utilityfunktion für den Diffusen Stickstoffeintrag in Gewässer wird durch den Richtwert von 40 kg/ha/Jahr und eine linear steigende Funktion nach dessen Überschreitung beschrieben. Alle Werte, die unterhalb des Grenzwerts liegen, werden gleich 0 gesetzt. Alle Werte oberhalb 160 kg/ha/Jahr erhalten den Maximalwert 1. ....	14
Abbildung 4: Die Utilityfunktion für den Diffusen Phosphoreintrag in Gewässer wird durch den Richtwert von 0.6 kg/ha/Jahr und eine linear steigende Funktion nach dessen Überschreitung beschrieben. Alle Werte, die unterhalb des Grenzwerts liegen, werden gleich 0 gesetzt. Alle Werte oberhalb 1.6 kg/ha/Jahr erhalten den Maximalwert 1. ....	15
Abbildung 5: Die Utilityfunktion für die Wasserverfügbarkeit der Pflanzen wird durch den Richtwert von 0.8 zum Verhältnis der aktuellen und der potenziellen Evapotranspiration beschrieben. Alle Werte, die unterhalb des Richtwerts liegen, werden durch eine linear fallende Funktion berechnet. Die Werte oberhalb des Richtwerts erhalten den Minimalwert 0. ....	17
Abbildung 6: Dargestellt werden die skalierten Werte der landwirtschaftlichen Nutzungseignungen zu dem summierten und dem reziproken Ranking. ....	18
Abbildung 7: Standortbedingungen einer landwirtschaftlichen Nutzfläche mit den Inputs, Outputs, Grundbedingungen und Wechselwirkungen. ....	23
Abbildung 8: Potential von Agroforstsystemen zur Erreichung der „Umweltziele Landwirtschaft“ im Kanton Zürich. ....	26
Abbildung 9: Anzahl der Überlagerungen von Umweltdefiziten und Umweltverbesserungen im Kanton Zürich. ....	28
Abbildung 10: Anzahl der Überlagerungen von Umweltdefiziten und Umweltverbesserungen im Kanton Zürich. Landwirtschaftliche Nutzflächen mit neun oder mehr Überlagerungen von Umweltdefiziten und Umweltverbesserungen werden hervorgehoben. ....	29
Abbildung 11: Dargestellt sind die skalierten Werte der Kriterien zu dem summierten und dem reziproken Ranking. Das summierte Ranking weist eine lineare Verteilung auf, das reziproke Ranking gleicht einer exponentiellen Verteilung. ....	30
Abbildung 12: Potential von Agroforstsystemen im Kanton Zürich mit dem reziproken Ranking. ....	31
Abbildung 13: Differenzkarte zum summierten und zum reziproken Ranking. ....	32
Abbildung 14: Potential der Parzellen im Kanton Zürich ohne Expertengewichtung. ....	34
Abbildung 15: Differenzkarte zum gewichteten und ungewichteten Potential. ....	35
Abbildung 16: Verteilung des Potentials zur Sensitivitätsanalyse der Utilityfunctions (UF). ....	36
Abbildung 17: Potential der Parzellen ohne Utilityfunctions. Eine vereinfachte Standardisierung wurde durchgeführt, um die Vergleichbarkeit zu ermöglichen. ....	37
Abbildung 18: Differenzkarte zu dem Potential mit und ohne Utilityfunctions. ....	38

Abbildung 19: Potential der Parzellen im Kanton Zürich ohne das Kriterium Stickoxid Immission (NO <sub>2</sub> ). .....	40
Abbildung 20: Differenzkarte zu dem Einbezug und Ausschluss des stark korrelierenden Kriteriums Stickoxid Immission (NO <sub>2</sub> ). .....	41
Abbildung 21: Die Abbildung zeigt die Verteilung der Differenz der Sensitivitätsanalysen zur Potentialkarte an. Die Sensitivität der Utilityfunctions (UF) hat den grössten Einfluss auf die Resultate. ....	42
Abbildung 22: Potential der Parzellen im Kanton Zürich mit veränderter Utilityfunction zu den Bodeneigenschaften. ....	43
Abbildung 23: Differenzkarte zum Potential mit und ohne veränderter Utilityfunction zu den Bodeneigenschaften. ....	44
Abbildung 24: Gegenüberstellung der Resultate von Kay et al. (2019b) zu den überlagernden Defiziten und der Potentialkarte zu den überlagernden Umweltdefiziten und Umweltverbesserungen der Masterarbeit. ....	48



# 1. Einleitung

Die Landwirtschaft hat sich in den letzten Jahrzehnten in der Schweiz verändert. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen (BLW 2018), der Verlust von landwirtschaftlicher Nutzfläche (Amt für Landschaft und Natur Zürich 2014) und der Produktionsdruck (Amt für Landschaft und Natur Zürich 2014) haben diese Veränderung geprägt. Zudem steigen die Ansprüche an die Landwirtschaft. Die landwirtschaftlichen Nutzflächen werden vermehrt als Erholungsraum, als ökologische Fördergebiete und für den Natur- und Umweltschutz verwendet (Amt für Landschaft und Natur Zürich 2014).

Um den Ansprüchen Rechnung zu tragen, hat sich die Schweiz mit dem Artikel 104 der Bundesverfassung dazu verpflichtet, die Landwirtschaft so zu gestalten, dass sie dazu beiträgt, die natürlichen Lebensgrundlagen und die Kulturlandschaft zu erhalten (BAFU & BLW 2016). Die Ziele des Artikels 104 wurden in den „Umweltzielen Landwirtschaft“ (UZL) ausformuliert. Im Statusbericht 2016 zu den UZL des Bundesamts für Umwelt und des Bundesamts für Landwirtschaft wird jedoch ersichtlich, dass ein Grossteil der Teilziele noch nicht erreicht werden konnte.

Agroforstsysteme (AFS) können durch die Bereitstellung von Ökosystemleistungen (Herzog 2011, Palma et al. 2007, Kaeser et al. 2011, Torralba et al. 2016, Manevski et al. 2019, Eichhorn et al. 2006) und die Förderung der Biodiversität (García de Jalón et al. 2018, Kaeser et al. 2011) einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der UZL leisten (Kay et al. 2019b). AFS sind Bewirtschaftungsmethoden, welche dadurch gekennzeichnet sind, dass sie sowohl die Praktiken der Landwirtschaft als auch die der Forstwirtschaft auf derselben Landnutzungsfläche umsetzen (Mosquera-Losada et al. 2009, Palma 2006). AFS sind historisch und kulturell in der Landwirtschaft der Schweiz, beispielsweise durch Streuobstwiesen, verankert (Herzog 1998).

Trotzdem ist die Zahl der AFS in Europa in den vergangenen Jahrzehnten stark durch die Intensivierung (Herzog 1998) und Spezialisierung der Landwirtschaft (Grünwald et al. 2009) gesunken. Die zunehmenden Ansprüche an die Ökosystemleistungen der Landschaft und Landwirtschaft machen Agroforstsysteme heute jedoch wieder attraktiv (Björklund 2019, Grünwald et al. 2009, Kaeser et al. 2010b, Mosquera-Losada et al. 2012).

Die Möglichkeit durch AFS einen Beitrag zur Erreichung der UZL zu leisten, wird in der Publikation von Kay et al. (2019b) aufgegriffen. Kay et al. (2019b) beschreiben einen Ansatz, um Gebiete aufzuzeigen, in denen eine Häufung an Defiziten der UZL auftreten. Die Publikation von Kay et al. (2019b) hat jedoch eine bedeutende Limitierung. Die Datenverfügbarkeit ist zu wichtigen Kriterien der Landwirtschaft nicht für die ganze Schweiz gewährleistet. Deshalb konnten beispielsweise Defizite zu den Bodeneigenschaften oder der Biodiversität nicht berücksichtigt werden. Auch soziokulturelle Defizite wurden nicht in die Berechnungen integriert, da keine räumlichen Daten dazu verfügbar sind.

Mit der Masterarbeit soll die Publikation von Kay et al. (2019b) erweitert werden. Die Limitierung der Datenverfügbarkeit kann durch die zusätzlichen Daten des Kantons Zürich teilweise ausgeräumt werden. Für Kriterien, zu denen auch vom Kanton Zürich keine räumlichen Daten zur Verfügung stehen, wurden deshalb Ansätze entwickelt und räumliche Daten erstellt. Die zusätzlichen

Kriterien beziehen sich, wie auch die Defizite aus Kay et al. (2019b), auf die nicht erreichten Teilziele der UZL.

Die Forschungsfrage der Masterarbeit lautet wie folgt:

Welche landwirtschaftlichen Nutzflächen im Kanton Zürich weisen Potential zur Erreichung der „Umweltziele Landwirtschaft“ durch Agroforstsysteme auf?

Zusätzlich wurden vier Unterfragen gestellt:

- Was sind die Definitionen und Anwendungen von Agroforstsystemen?
- Welche Ökosystemleistungen können zur Erreichung der „Umweltziele Landwirtschaft“ beitragen?
- Wie ist das Potential für AFS räumlich verteilt?
- Wie werden die Potentialflächen bewirtschaftet?

## 2. Material und Methoden

### 2.1. Literaturrecherche

In der Literaturrecherche wurden Definitionen und Grundlagen von Agroforstsystemen (AFS) ermittelt. Zu den Grundlagen gehören die Kategorien von AFS und Informationen zur Förderung von Umweltverbesserungen, zur Milderung von Umweltdefiziten sowie zur Bereitstellung von Ökosystemleistungen durch AFS.

Die angestellte Literaturrecherche zu Agroforstsystemen erfolgte in zwei Stufen:

In der ersten Phase der Literaturrecherche wurden für die Suche Schlagworte und Formulierungen wie: „Agroforst“, „Agroforstsystem“, „Agroforst in der Schweiz“, „Potential zur Verbesserung von Umweltbedingungen durch Agroforstsysteme“, „Ökosystemleistungen von Agroforstsystemen“ und „Umweltdefizite“ verwendet.

In der zweiten Phase wurden aus den gesichteten Publikationen die Autoren identifiziert, welche oft referenziert wurden. Zu diesen Autoren wurde in Kombination mit den oben genannten Stichworten weiter recherchiert. Dadurch konnten auch neue Publikationen zu Agroforstsystemen identifiziert werden.

Bei der Literaturrecherche zur Methodik wurden Schlagworte und Formulierungen wie: „MCDA“, „GIS-basierte MCDA“ und „Agroforst MCDA“ verwendet.

Die für die Masterarbeit relevanten Informationen wurden während der Literaturrecherche aus den Publikationen kopiert und referenziert. Das erstellte Dokument diente als Hilfestellung bei der Verfassung des Berichts.

### 2.2. Grundlagedaten

Die Kriterien repräsentieren jeweils ein Umweltdefizit oder eine Umweltverbesserung, das bzw. die durch Agroforstsysteme (AFS) gemildert respektive verbessert werden kann. Die Wahl der Kriterien wurde auf die „Umweltziele Landwirtschaft“ (UZL) aus dem Statusbericht von BAFU & BLW (2016), die Ökosystemleistungen von AFS und die Verfügbarkeit der Daten (Tabelle 1) vom Kanton Zürich und dem Schweizer Bund abgestimmt. Zusätzlich wurde ein Layer zu den Siedlungsgebieten aus den Vorlesungsunterlagen von „Multi-Criteria Decision Analysis“ der ETH-Zürich entnommen.

Tabelle 1: Die Kriterien werden mit ihren verwendeten Grundlagedaten aus dem GIS-Browser des Bundes und des Kantons Zürich sowie den Daten aus der Vorlesung „Multi-Criteria Decision Analysis“ der ETH dargestellt. Die Layer der Grundlagedaten werden mit der Bezeichnung und der Art/Auflösung beschrieben.

Kriterium	Bereitstellung von Daten	Bezeichnung des Layers	Art/Auflösung der Layer
Wildtierkorridore	Kanton, maps.zh.ch	Wildtierkorridore	Polygon-Layer (Perimeter Wildtierkorridore)
Deckungsgrad der Bienen	Kanton, maps.zh.ch	Bienenstände	Punkt-Layer (Bienenstände)
Biodiversität	Kanton, maps.zh.ch	Kantonale ÖQV-Fördergebiete	Polygon-Layer (Kant. Fördergebiete für ökol. Ausgleich)
Ästhetik	Kanton, maps.zh.ch	Landwirtschaftliche Bewirtschaftung (öffentliche Version)	Polygon-Layer (Bewirtschaftungseinheit)
Zugang der Parzelle zur Erholung	Kanton, maps.zh.ch	Wanderwege	Linien-Layer (Wander- und Reitwege)
	Vorlesungsunterlagen von „Multi-Criteria Decision Analysis“ der ETH-Zürich, interne Daten (Grêt-Regamey & Van Strien 2019)	Siedlungsgebiete	Polygon-Layer, (Siedlungsgebiete)
Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft	Kanton, maps.zh.ch	Gemeinde-GIS	Polygon-Layer (Gemeindegrenzen)
	Kanton Zürich, statistik.th.ch	Gemeindeporträt Kanton Zürich	Excelltabelle (Daten der Zürcher Gemeinden)
Feinstaub Immission (PM10)	Kanton, maps.zh.ch	Feinstoff-Immission (PM10)	Raster-Layer, 100 m x 100 m
Stickoxid Immission (NO2)	Kanton, maps.zh.ch	Stickoxid-Immission (NO2)	Raster-Layer, 100 m x 100 m
Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer	Bund, map.geo.admin.ch	Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer	Raster-Layer, 100 m x 100 m
Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer	Bund, map.geo.admin.ch	Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer	Raster-Layer, 100 m x 100 m
Bodeneigenschaften	Kanton, maps.zh.ch	Landwirtschaftliche Nutzungseignungskarte	Polygon-Layer (landwirtschaftliche Parzellen)
Standortbelastung	Kanton, maps.zh.ch	Kataster der belasteten Standorte	Polygon-Layer (belastete Parzellen)
Wasserverfügbarkeit für Pflanzen	Bund, map.geo.admin.ch	Wasserverfügbarkeit für Pflanzen	Raster-Layer, 250 m x 250 m

### 2.3. Aufbereitung der Layer

Die Grundlagedaten aus Tabelle 1 wurden im Rahmen der Masterarbeit mit den Softwares ArcGIS und R aufbereitet und so vereinheitlicht, dass sie als Ausgangslage für die Kriterien dienen können. Die Arbeitsschritte zur Vereinheitlichung sind:

- Die Projektion auf das Koordinatensystem CH1903\_LV03 mit dem ArcGIS-Tool „Project (Data Management)“.
- Der Verschnitt der Polygon-Layer mit den landwirtschaftlichen Nutzflächen. Dafür wurde das ArcGIS-Tool „Intersect“ verwendet.

Alle zusätzlichen Verarbeitungsschritte zur Vereinheitlichung werden im Folgenden aufgezeigt. Für die Kriterien Wildtierkorridore und Biodiversität waren keine weiteren Verarbeitungsschritte nötig. Das Kriterium Bodeneigenschaften musste nur auf das Koordinatensystem CH1903\_LV03 projiziert werden.

### 2.3.1. Deckungsgrad der Bienen

Der Punkt-Layer der Bienenstände wurde zuerst mit dem ArcGIS-Tool „Buffer“ mit einer Pufferfläche von 300 m Radius umgeben und anschliessend projiziert und verschnitten.

### 2.3.2. Ästhetik

Das Kriterium der Ästhetik wurde durch einen entwickelten Ansatz aus den Daten des Layers „Landwirtschaftliche Bewirtschaftung“ gebildet. Dabei werden die zwölf Kategorien des Layers „Landwirtschaftliche Bewirtschaftung“ (Tabelle 2) aufgrund von drei Eigenschaften (Landnutzung Nutzungsintensität und ökologischer Wert) beurteilt (Lindemann-Matthies et al. 2010).

Tabelle 2: Dargestellt ist die Berechnung der Werte für das Kriterium Ästhetik. Diese erfolgt über die Bewertung (high = 0.333, medium = 0.166, low = 0.083) der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung aufgrund der drei Eigenschaften. Das Potential zur Verbesserung der „Umweltziele Landwirtschaft“ durch Agroforstsysteme ergibt sich aus der Differenz zwischen dem maximal möglichen Ästhetik-Wert (1) und dem ermittelten Wert (Ästhetik-Wert).

Kategorie	Landnutzung	Nutzungsintensität	ökologischer Wert	Ästhetik-Wert	Potential
Biodiversitätsförderfläche	high	high	high	1.00	0
Ackerfläche	low	low	low	0.25	0.42
Kunstwiese	low	medium	low	0.33	0.67
Wiesen	medium	medium	low	0.42	0.58
Weiden	medium	medium	low	0.42	0.58
Reben	high	medium	medium	0.67	0.33
Obst	high	medium	medium	0.67	0.33
übrige Dauerkulturen	medium	medium	low	0.42	0.58
geschützter Anbau	low	low	low	0.25	0.75
Übrige Flächen innerhalb landwirtschaftlicher Nutzfläche (z.B. Hecken mit Pufferstreifen)	high	high	high	1.00	0
Flächen nicht landwirtschaftlicher Nutzfläche	high	high	high	1.00	0
Sömmerungsgebiet	high	high	high	1.00	0

Für die Validierung der Ästhetik-Werte wurde Beatrice Schüpbach, Co-Autorin der Publikation Lindemann-Matthies et al. (2010), zurate gezogen.

### 2.3.3. Zugang der Parzelle zur Erholung

Die räumlichen Daten für das Kriterium Zugang der Parzelle zur Erholung ergeben sich aus dem entwickelten Ansatz, der die Grundlagedaten zu den Linien-Layer der Wander- und Reitwege und den Polygon-Layer zur Siedlungsfläche verarbeitet.

Der Linien-Layer der Wander- und Reitwege wurde zuerst mit dem ArcGIS-Tool „Buffer“ mit einer Pufferfläche von 250 m Radius umgeben und anschliessend projiziert und verschnitten.

Mit dem ArcGIS-Tool „Near“ wurde die Distanz der landwirtschaftlichen Parzellen zu den Siedlungsgebieten berechnet. Diese Distanz wurde in R in vier Kategorien (siedlungsintern, am Siedlungsrand, siedlungsnah, in der Landschaft) zur Erreichbarkeit der Parzelle unterteilt (Verein Metropolitanraum Zürich 2014). Mit der Annahme für das Spaziertempo von 3 km/h und der Erreichbarkeit wurden die überwindbaren Distanzen berechnet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Die Aufbereitung der Daten zur Ermittlung des Werts der Erreichbarkeit der landwirtschaftlichen Parzelle. Für das Spaziertempo wurde eine Geschwindigkeit von 3 km/h angenommen.

Kategorie der Erreichbarkeit	Erreichbarkeit	Überwindbare Distanz	Erreichbarkeit der landw. Parzelle
siedlungsintern	10 Minuten	Kleiner als 500m	1
am Siedlungsrand	20 Minuten	Zwischen 500m und 1000m	0.666
siedlungsnah	30 Minuten	Zwischen 1000m und 1500m	0.333
in der Landschaft	über 30 Minuten	Grösser als 1500m	0

### 2.3.4. Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft

Dieses Kriterium wird durch das Interesse an der landwirtschaftlichen Teilhabe der Gemeinden im Kanton Zürich dargestellt. Die verwendeten Daten entstammen den Gemeindeporträts aus dem Kanton Zürich (Statistisches Amt Kanton Zürich, 2020) und betreffen die Wahlergebnisse der Gemeinden zur Kantonsratswahl des Jahres 2019, das steuerbare Einkommen natürlicher Personen des Jahres 2016 und die Schüler der Tertiärstufe des Jahres 2018. Dabei wurden jeweils die aktuellsten verfügbaren Daten verwendet. Die Gemeinden wurden mit folgendem Ansatz auf die Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft geprüft:

- Kantonsratswahl des Jahres 2019: Gemeinden, bei denen der Wähleranteil der Parteien GP, GLP und SP über dem Durchschnitt des Wähleranteils dieser drei Parteien in allen Gemeinden im Kanton Zürich lag, wurden als geeignet eingestuft. Der Durchschnitt liegt bei rund 33.5%.
- Steuerbares Einkommen natürlicher Personen des Jahres 2016: Der Mittelwert zum 75% Quantil (rund 87'000 CHF) und zum Mittelwert (rund 55'000 CHF) des steuerbaren Einkommens natürlicher Personen wurde für alle Gemeinden im Kanton Zürich berechnet. Die Gemeinden, deren Median des steuerbaren Einkommens natürlicher Personen zwischen den berechneten Werten liegt, wurden als geeignet eingestuft.

- Schüler der Tertiärstufe des Jahres 2018: Der Mittelwert der Schüler der Tertiärstufe aller Gemeinden im Kanton Zürich (rund 8.3 Schüler pro 1000 Einwohner) wurde berechnet. Die Gemeinden, in denen der Anteil der Schüler in der Tertiärstufe grösser als der Mittelwert ist, werden als geeignet eingestuft.

Für Gemeinden, die in allen drei Kriterien als geeignet eingestuft werden, wird eine Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft angenommen. In allen anderen Gemeinden wird keine Bereitschaft angenommen.

### **2.3.5. Feinstaub Immission (PM10) und Stickoxid Immission (NO2)**

Die Daten des Raster-Layers zur Feinstaub Immission (PM10) und zur Stickoxid Immission (NO2) werden durch 1000 geteilt, um die Einheit in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  zu erhalten und anschliessend projiziert. Die Werte der Raster-Layer werden mit der R-Funktion „raster::extract“ den landwirtschaftlichen Nutzflächen zugeteilt. Die Funktion ermöglicht durch das Argument „fun = mean“ den Polygonen, welche auf mehreren Rasterzellen liegen, den Mittelwert der Rasterzellen zuzuschreiben.

### **2.3.6. Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer, Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer und Wasserverfügbarkeit für Pflanzen**

Die Daten der Raster-Layer Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer, Diffusen Phosphoreintrag in Gewässer und Wasserverfügbarkeit für Pflanzen werden mit der R-Funktion „raster::extract“ den landwirtschaftlichen Nutzflächen zugeteilt.

### **2.3.7. Standortbelastung**

Der Polygon-Layer zur Standortbelastung wurde projiziert und verschnitten. Anschliessend wurden mit der „Edit“-Funktion in ArcGIS alle Standorte, bei denen der Altlaststatus nicht gleich 4 oder 5 ist, aus dem Layer entfernt. Der Altlaststatus von 4 steht für einen überwachungspflichtigen und der von 5 für einen sanierungspflichtigen Standort. Diese Standorte wurden ausgewählt, da für die Kategorien 4 und 5 Massnahmen erforderlich sind. Für die Kategorien 1 bis 3 besteht hingegen kein konkreter Handlungsbedarf.

## **2.4. Multi-criteria decision analysis (MCDA)**

Die MCDA ist eine Methode, um eine Vielzahl an Entscheidungsträgern, Entscheidungskriterien und Ökosystemleistungen zu analysieren und zu optimieren (Grêt-Regamey et al. 2017, Klein et al. 2013, Malczewski 2006). Die Methode der MCDA wurde gewählt, da sie ermöglicht widersprüchliche Ziele zu berücksichtigen (Collins et al. 2001, Kaim et al. 2018) und ökologische, wirtschaftliche, soziale Ziele sowie Ziele von nicht Markt bestimmten Leistungen gleichermaßen mit einzubeziehen (Kaim et al. 2018, Klein et al. 2013). Geografische Informationssysteme (GIS) stehen zur Entscheidungsfindung mit räumlichen Daten zur Verfügung. Die GIS-basierte MCDA ermöglicht räumliche Daten mit Stakeholdern nach ihren Präferenzen zu gewichten und daraus Informationen für die Entscheidungsträger zu generieren (Malczewski 2006).

Die GIS-basierte MCDA werden, wie auch in der Masterarbeit, häufig für die Analyse von Potentialflächen in der Landwirtschaft verwendet (Kazemi & Akinici 2018, Yalaw et al. 2016).

### 2.4.1. Multi-objective decision making (MODM)

Die Methode der „Multi-objective decision making“ (MODM) ist eine Variante der MCDA, bei welcher die Auswertung durch das Ziel geprägt ist. Die andere Variante der MCDA ist die „Multi-attribute decision making“ (MADM). Die MODM unterscheidet sich zur MADM darin, dass die Lösung des Problems aufgrund der Berechnung der besten Alternative aus dem Lösungsraum und nicht durch Auswahl einer Handlungsalternative erstellt wird (Zimmermann und Gutsche, 1991). Die MODM wurde für die Masterarbeit gewählt, da folgende Eigenschaften erfüllt sind: die zulässigen Alternativen sind nicht vorbestimmt, die „beste“ Alternative liegt im Lösungsraum, die Zielfunktionen (Kriterien) sind klar quantifizierbar (Zimmermann und Gutsche, 1991).

Die MODM erfordert die Gewichtung der einbezogenen Kriterien. Dazu stehen verschiedene Methoden zur Verfügung: beispielsweise die Ranking Methode, die Rating Methode oder die Methode des paarweisen Vergleichs. Die Ranking Methode wurde für die Masterarbeit gewählt, da der Überblick über die Gewichtung der 13 Kriterien leichter bewahrt werden kann. Des Weiteren konnten der Aufwand und die zeitliche Beanspruchung der Experten, durch die Ranking Methode minimiert und dadurch mehrere Experten aus unterschiedlichen Fachgebieten der Landwirtschaft konsultiert werden.

#### 2.4.1.1. Ranking Methode

Bei der Ranking Methode werden die Kriterien der Wichtigkeit nach geordnet. Dabei können verschiedene Varianten zur Anwendung kommen, um den numerischen Wert der Gewichtung zu generieren: das summierte, das reziproke und das exponentielle Ranking. In der Masterarbeit wurde das summierte Ranking angewandt, welches durch die folgende Formel (Formel 1) beschrieben wird:

$$\text{Formel 1: } w_j = \frac{n - r_j + 1}{\sum(n - r_k + 1)}$$

Dabei steht „ $w_j$ “ für das standardisierte Gewicht des Kriteriums „ $j$ “. „ $r_j$ “ ist der Rang des Kriteriums „ $j$ “ im Ranking und „ $k$ “ ist mit „ $k = 1, \dots, n$ “ die Laufvariable der Anzahl Kriterien („ $n$ “). Jedes Kriterium wird durch die Formel mit der Funktion „ $n - r_j + 1$ “ gewichtet und durch die Summe aller Gewichte  $\sum n - r_j + 1$  normalisiert. (Grêt-Regamey & Van Strien 2019)

#### 2.4.1.2. Wahl der Experten

Bei der Wahl der Experten wurde darauf geachtet, dass ein möglichst breites Feld an Fachbereichen der Landwirtschaft und an Themenbereich der Kriterien abgedeckt wird. Es wurden Experten aus den Forschungsinstituten Agroscope, Ithaka Institut und FiBL, aus dem Departement Umwelt-systemwissenschaften der ETH Zürich, aus der Dienstabteilung Grün Stadt Zürich sowie aus der Praxis konsultiert (Tabelle 4).



Tabelle 4: Liste der konsultierten Experten und ihrem Arbeitsfeld.

<b>Experte/Expertin</b>	<b>Arbeitsfeld</b>
Sonja Kay	Postdoc Agroscope
Johanna Rüegg	FiBL (Forschungseinrichtung für biologischen Landbau)
Christina Vaccaro	PhD Student (ETH Zürich), Lehrstuhl für Agrarökologie
Bernhard Koch	Fachbereichsleiter Landwirtschaft von Grün Stadt Zürich
Katja Degonda	Wiss. Assistentin Agroscope & Ithaka Institut
Philipp Baumann	Doktorand (ETH Zürich), Lehrstuhl für nachhaltige Agrarökosysteme
Frank Meissner	Gartenfachkraft der SoLaWi „Meh als Gmües“
Matthias Brück	Landschaftsarchitekt & Partizipationstrainer
Beatrice Schüpbach	Wiss. Mitarbeiterin Agroscope

## 2.5. Herleitung und Utilityfunctions der Kriterien

Die Kriterien wurden aus dem Statusbericht von BAFU & BLW (2016) zu den nicht erreichten Teilzielen der „Umweltziele Landwirtschaft“ (UZL) hergeleitet. In diesem Kapitel wird erläutert, auf welche Teilziele mit den Kriterien Bezug genommen wurde, wie Agroforstsysteme zur Erreichung der Teilziele beitragen können und welche landwirtschaftlichen Nutzflächen Potential haben einen Beitrag dazu zu leisten. Wenn im Folgenden davon gesprochen wird, dass eine Parzelle als geeignet oder ungeeignet eingestuft wird, ist damit gemeint, dass die Parzelle Potential bzw. kein Potential hat, einen Beitrag zur Erreichung der Teilziele der UZL zu leisten. Dieses Potential entsteht durch die Milderung von Umweltdefiziten (UD) oder die Steigerung von Umweltverbesserungen (UV), welche von den Kriterien dargestellt werden. Da die Kriterien unterschiedliche Einheiten haben, ist eine Normierung zur Vergleichbarkeit notwendig. Dafür wurde eine Utilityfunction für jedes Kriterium entwickelt, welche die Werte auf eine Skala von 0 bis 1 normiert.

### 2.5.1. Wildtierkorridore

Das Kriterium der Wildtierkorridore bezieht sich auf das Teilziel „Biodiversität 1“ der UZL. Zum Stand der Zielerreichung 2016 heisst es u.a.: „Defizite bestehen auch bei der Vernetzung und Durchlässigkeit.“ (BAFU & BLW 2016).

Agroforstsysteme (AFS) schaffen Strukturvielfalt (García de Jalón et al. 2018, Kay et al. 2008, McAdam et al. 2009) auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen, wodurch die Wildtierkorridore attraktiver für das ziehende Wild werden (Schacht et al. 2002). Daraus wurde die Utilityfunction zu den Wildtierkorridoren gebildet. Diese wertet alle Parzellen, die sich innerhalb des Polygon-Layers für Wildtierkorridore befinden, als geeignet (Wert 1) und alle, die sich ausserhalb befinden, als ungeeignet (Wert 0).

### 2.5.2. Deckungsgrad der Biene

Das Kriterium des Deckungsgrads der Biene bezieht sich auf das Teilziel „Biodiversität 3“ der UZL. Zum Stand der Zielerreichung 2016 heisst es: „Die intensive schweizerische Landwirtschaft hat

nach wie vor zahlreiche negative Auswirkungen auf naturnahe Ökosysteme [...] und deren Qualität, so dass deren Leistungen eingeschränkt sind. Das Ziel ist nicht erreicht.“ (BAFU & BLW 2016).

AFS steigern die Strukturvielfalt (Kay et al. 2008, McAdam et al. 2009) sowie die Qualität und Quantität der Habitate für Bestäuber (Sutter et al. 2017). Aus diesen Leistungen wurde die Utilityfunktion zum Deckungsgrad der Biene entwickelt. Diese wertet alle Parzellen, die ausserhalb der Pufferfläche der Bienenstände liegen, als geeignet (Wert 1) zur Verbesserung des Deckungsgrads der Biene. Alle Parzellen, die innerhalb der Pufferfläche liegen, werden als ungeeignet (Wert 0) gewertet, da auf diesen Parzellen der Deckungsgrad als gegeben angenommen wird.

### 2.5.3. Biodiversität

Das Kriterium der Biodiversität bezieht sich auf die Teilziele „Biodiversität 2 und 3“ der UZL. Zum Stand der Zielerreichung 2016 heisst es u.a.: „Für viele einheimischen wildlebenden Verwandten von Kulturpflanzen (CWR) und wildlebenden Arten ist das Ziel nicht erreicht.“ und „Die intensive schweizerische Landwirtschaft hat nach wie vor zahlreiche negative Auswirkungen auf naturnahe Ökosysteme [...] und deren Qualität, so dass deren Leistungen eingeschränkt sind. Das Ziel ist nicht erreicht.“ (BAFU & BLW 2016).

AFS steigern die Biodiversität (García de Jalón et al. 2018, Kay et al. 2019a, Torralba et al. 2016) wodurch auf Flächen, welche nicht als „Kantonale Fördergebiete für ökologischen Ausgleich“ gelten, eine Verbesserung der Biodiversität hervorgerufen werden kann. Da die Fördergebiete besonderen Anforderungen genügen müssen, wird davon ausgegangen, dass die Biodiversität dort bereits in hohem Masse vorhanden ist oder gefördert wird (Schweizer Eidgenossenschaft 2007). Daraus wurde die Utilityfunktion zur Biodiversität gebildet, die Parzellen, welche sich ausserhalb der „Kantonalen Fördergebiete für ökologischen Ausgleich“ befinden, als geeignet (Wert 1) zur Verbesserung der Biodiversität wertet. Alle Parzellen, die sich innerhalb der Fördergebiete befinden, werden als ungeeignet (Wert 0) gewertet.

### 2.5.4. Ästhetik

Das Kriterium der Ästhetik bezieht sich auf die Teilziele „Landschaft 1, 2 und 3“ der UZL. Zum Stand der Zielerreichung 2016 heisst es u.a.: „Durch Umwandlung von Landwirtschaftsland in Siedlungsflächen sowie Nutzungsaufgabe gehen weiterhin Landwirtschaftsflächen verloren. Das Ziel ist nicht erreicht.“ (BAFU & BLW 2016) und „Das Ziel des Erhalts der Vielfalt der Kulturlandschaften ist heute nicht erreicht.“ (BAFU & BLW 2016). Der Stand zur: „Erhaltung, Förderung und Weiterentwicklung ihrer regionsspezifischen, charakteristischen, natürlichen, naturnahen und baulichen Elemente“ (BAFU & BLW 2016) lässt sich laut BAFU & BLW (2016) noch nicht beurteilen.

AFS können zur Erreichung dieser Teilziele beitragen, da sie durch die bereitgestellten Ökosystemleistungen und die erhöhte Biodiversität auch die Ästhetik der Landschaft steigern (García de Jalón et al. 2018, Eichhorn 2006, Graves et al. 2009, Herzog 1998). Die Utilityfunktion wurde bereits bei der Aufbereitung der Grundlagedaten angewandt (Tabelle 2).

### 2.5.5. Zugang der Parzelle zur Erholung

Das Kriterium des Zugangs der Parzelle zur Erholung bezieht sich auf die Teilziele „Landschaft 1, 2 und 3“ der UZL (s. 2.5.4. Ästhetik). Zur Erreichung der Teilziele können AFS beitragen, da sie die Erholungswirkung steigern (McAdam 2009). Um die Erholungswirkung auch erleben zu können, müssen die Parzellen jedoch für die Bevölkerung auch erreichbar sein (Verein Metropolitanraum Zürich 2014), weshalb das Kriterium auf den Zugang der Parzelle ausgerichtet ist.

Um den Zugang der Parzelle zur Erholung räumlich darstellen zu können, wurde die Utilityfunktion entwickelt, welche sich aus der Kombination der Erreichbarkeit der Parzelle und der Pufferfläche um das Wander- und Reitwegenetz ergibt. Die Parzellen, welche sich innerhalb der Pufferfläche befinden, werden als geeignet (Wert 1) und alle Parzellen, welche sich ausserhalb dieser Pufferfläche befinden, werden als ungeeignet (Wert 0) eingestuft. Diese Werte werden mit den Werten aus der Erreichbarkeit der Parzelle (Tabelle 3) addiert und gemittelt. Daraus ergibt sich der Wert des Kriteriums Zugang der Parzelle zur Erholung.

### 2.5.6. Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft

Das Kriterium der Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft bezieht sich auf die Teilziele „Landschaft 1, 2 und 3“ der UZL (s. 2.5.4. Ästhetik). Zur Erreichung der Teilziele können AFS beitragen, da die Partizipation in Agroforstsystemen einfacher möglich ist als in rein Maschinen betriebenen Landwirtschaftssystemen. Agroforstsysteme haben durch den erhöhten manuellen Arbeitsanteil (Chalmin 2009) für die Ernte von Früchten, das Schneiden der Bäume, das Pflanzen von Hecken etc. die Möglichkeit, die Partizipation der Bevölkerung zu steigern. Die Partizipation an der Landschaft und Landwirtschaft kann schliesslich die Identität fördern (Brack 2002, Fagerholm et al. 2016).

Die Utilityfunktion zur Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft wertet nach der Anwendung der Aufbereitung der Grundlagedaten (s. 2.3.4. Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft) die Parzellen innerhalb der ausgewählten Gemeinden als geeignet (Wert 1) und die Parzellen ausserhalb dieser Gemeinden als ungeeignet (Wert 0).

### 2.5.7. Feinstaub Immission (PM10)

Das Kriterium der Feinstaub Immission (PM10) bezieht sich auf das Teilziel „Klima und Luft. Dieselschlamm“ der UZL. Zum Stand der Zielerreichung 2016 heisst es: „Die Landwirtschaft emittiert zurzeit rund 226 Tonnen Dieselschlamm pro Jahr. Das Ziel ist noch nicht erreicht.“ (BAFU & BLW 2016).

Durch die Leistung von AFS, Partikel aus der Luft aufzunehmen (Beckett et al. 2000), kann zur Erreichung der Teilziele beigetragen werden. Aus dieser Leistung wurde das Kriterium entwickelt, welches durch die folgende Utilityfunktion normiert wird.

Die Utilityfunktion zur Feinstaub Immission (PM10) wird auf den aufbereiteten Raster-Layer angewandt. Alle Rasterzellen, welche einen Wert unterhalb des gesetzlichen Grenzwerts von  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Wert für das Jahresmittel (BAFU 2017)) haben, werden als ungeeignet eingestuft und erhalten den Wert 0. Der Grenzwert repräsentiert den Übertritt zu dem Umweltdefizit und deshalb wird von

einem schon bestehenden Potential von 0.5 ausgegangen. Für die Werte, die über dem Grenzwert liegen, wird ein linearer Anstieg des skalierten Werts angenommen (Abbildung 1). Alle Werte, die grösser als  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sind, erhalten ebenfalls den Maximalwert 1. Die Abstufung der Jahresmittelwerte nach Überschreitung des Grenzwerts stützt sich auf die Karteninformationen der Grundlagedaten.

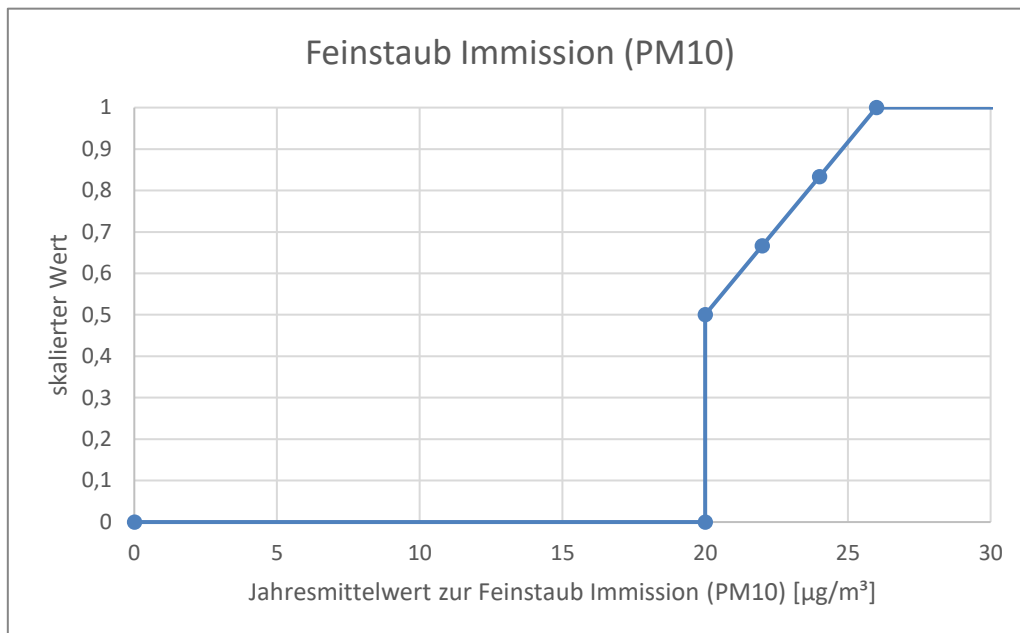


Abbildung 1: Die Utilityfunktion für die Feinstaub Immission (PM10) wird durch den Grenzwert von  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und eine linear steigende Funktion nach dessen Überschreitung beschrieben. Alle Werte, die unterhalb des Grenzwerts liegen werden gleich 0 gesetzt. Alle Werte oberhalb  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erhalten den Maximalwert 1.

### 2.5.8. Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>)

Das Kriterium der Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>) bezieht sich auf die Teilziele „Klima und Luft: Stickstoffhaltige Luftschadstoffe“ der UZL. Zum Stand der Zielerreichung 2016 heisst es: „Die Emissionen von Ammoniak-Stickstoff betragen im Jahr 2014 rund 48 000 Tonnen Stickstoff. Das Ziel ist nicht erreicht.“ (BAFU & BLW 2016).

Da Bäume Stickoxide möglicherweise direkt über die Blätter absorbieren, wie die Publikation von Brack (2002) besagt, könnten AFS zur Erreichung dieses Teilziels beitragen.

Die Utilityfunktion zur Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>) wird auf den aufbereiteten Raster-Layer angewandt. Alle Rasterzellen, welche einen Wert unterhalb des gesetzlichen Grenzwerts von  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Wert für das Jahresmittel (BAFU 2017)) haben, werden als ungeeignet eingestuft und erhalten den Wert 0. Der Grenzwert repräsentiert den Übertritt zum Umweltdefizit, weshalb von einem schon bestehenden Potential von 0.5 ausgegangen wird. Für die Werte, die über dem Grenzwert liegen, wird ein linearer Anstieg des skalierten Werts angenommen (Abbildung 2). Alle Werte, die

grösser als  $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sind, erhalten ebenfalls den Maximalwert 1. Die Abstufung der Jahresmittelwerte nach Überschreitung des Grenzwerts stützt sich auf die Karteninformationen der Grundlagendaten.

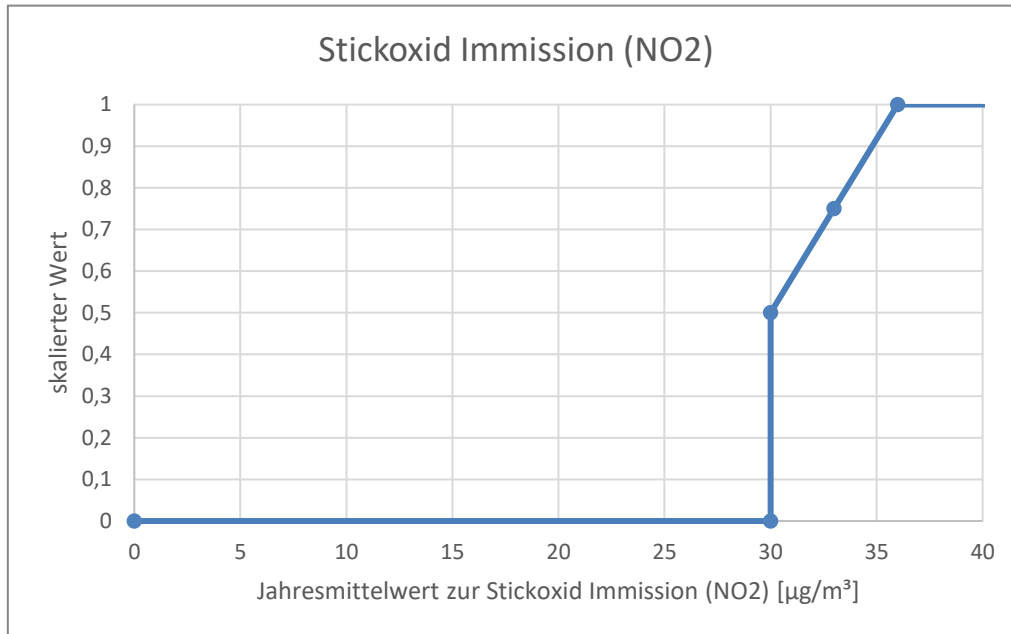


Abbildung 2: Die Utilityfunktion für die Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>) wird durch den Grenzwert von  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und eine linear steigende Funktion nach dessen Überschreitung beschrieben. Alle Werte, die unterhalb des Grenzwerts liegen, werden gleich 0 gesetzt. Alle Werte oberhalb  $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erhalten den Maximalwert 1.

### 2.5.9. Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer

Das Kriterium des Diffusen Stickstoffeintrags in Gewässer bezieht sich auf die Teilziele „Wasser: Nitrat 1 und 2“ der UZL. Zum Stand der Zielerreichung 2016 heisst es: „Im Zuger- und Murtensee überschreitet der Phosphorgehalt  $20 \mu\text{g}/\text{l}$ . Das Sauerstoffziel ist zusätzlich beim Baldegger-, Sempacher-, Hallwiler- und der Bielersee nicht erreicht. Bei den Kleinseen fehlt eine Übersicht.“ und „Die bisherige Reduktion [der landwirtschaftsbedingten Stickstoffeinträge in die Gewässer, Anm. d. Verf.] betrug gegenüber 1985 rund 25 %. Das Ziel ist nicht erreicht.“ (BAFU & BLW 2016).

Durch die Leistung von AFS, den Wasserhaushalt auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche zu regulieren und Nährstoffe in tieferen Bodenschichten aufzunehmen, kann die Auswaschung von Stickstoff gemildert werden (Manevski et al. 2019, Palma et al. 2007, Wolz et al. 2018).

Die entwickelte Utilityfunktion zum Diffusen Stickstoffeintrag in Gewässer wird auf den aufbereiteten Raster-Layer angewandt. Alle Rasterzellen, welche einen Wert unterhalb des Richtwerts von  $40 \text{ kg}/\text{ha}/\text{Jahr}$  (Prasuhn 2016) haben, werden als ungeeignet eingestuft und erhalten den Wert 0. Der Richtwert repräsentiert den Übertritt zum Umweltdefizit, weshalb von einem schon bestehenden Potential von 0.5 ausgegangen wird. Für die Werte, die über dem Grenzwert liegen, wird ein linearer Anstieg des skalierten Werts angenommen (Abbildung 3). Alle Werte, die grösser

als 160 kg/ha/Jahr sind, erhalten ebenfalls den Maximalwert 1. Die Abstufung der Jahresmittelwerte nach Überschreitung des Grenzwerts stützt sich auf die Karteninformationen der Grundlagedaten.

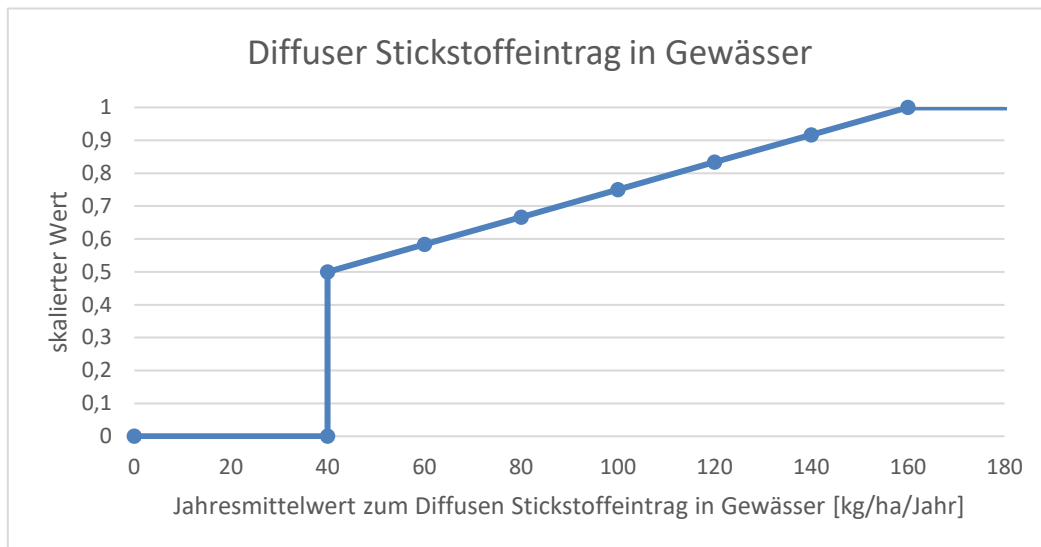


Abbildung 3: Die Utilityfunktion für den Diffusen Stickstoffeintrag in Gewässer wird durch den Richtwert von 40 kg/ha/Jahr und eine linear steigende Funktion nach dessen Überschreitung beschrieben. Alle Werte, die unterhalb des Grenzwerts liegen, werden gleich 0 gesetzt. Alle Werte oberhalb 160 kg/ha/Jahr erhalten den Maximalwert 1.

## 2.5.10. Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer

Das Kriterium des Diffusen Phosphoreintrags in Gewässer bezieht sich auf das Teilziel „Wasser: Phosphor“ der UZL. Zum Stand der Zielerreichung 2016 heisst es u.a.: „Im Zuger- und Murtersee überschreitet der Phosphorgehalt 20 µg/l. Das Sauerstoffziel ist zusätzlich beim Baldegger-, Sem-pacher-, Hallwiler- und der Bielersee nicht erreicht.“ (BAFU & BLW 2016).

Durch die Leistung von AFS, den Wasserhaushalt auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche zu regulieren und die Speicherkapazität von Phosphor zu erhöhen, kann die Auswaschung von Phosphor gemildert werden (Schoumans et al. 2014) und somit zur Erreichung des Teilziels beigetragen werden.

Die Utilityfunktion zum Diffusen Phosphoreintrag in Gewässer wird auf den aufbereiteten Raster-Layer angewandt. Dabei werden alle Rasterzellen, welche einen Wert unterhalb des Richtwerts von 0,6 kg/ha/Jahr (Prasuhn 2016) haben, als ungeeignet eingestuft und erhalten den Wert 0. Der Richtwert repräsentiert den Übertritt zum Umweltdefizit, weshalb von einem schon bestehenden Potential von 0,5 ausgegangen wird. Für die Werte, die über dem Grenzwert liegen, wird ein linearer Anstieg des skalierten Werts angenommen (Abbildung 4). Alle Werte, die grösser als 1,6 kg/ha/Jahr sind, erhalten ebenfalls den Maximalwert 1. Die Abstufung der Jahresmittelwerte nach Überschreitung des Grenzwerts stützt sich auf die Karteninformationen der Grundlagedaten.

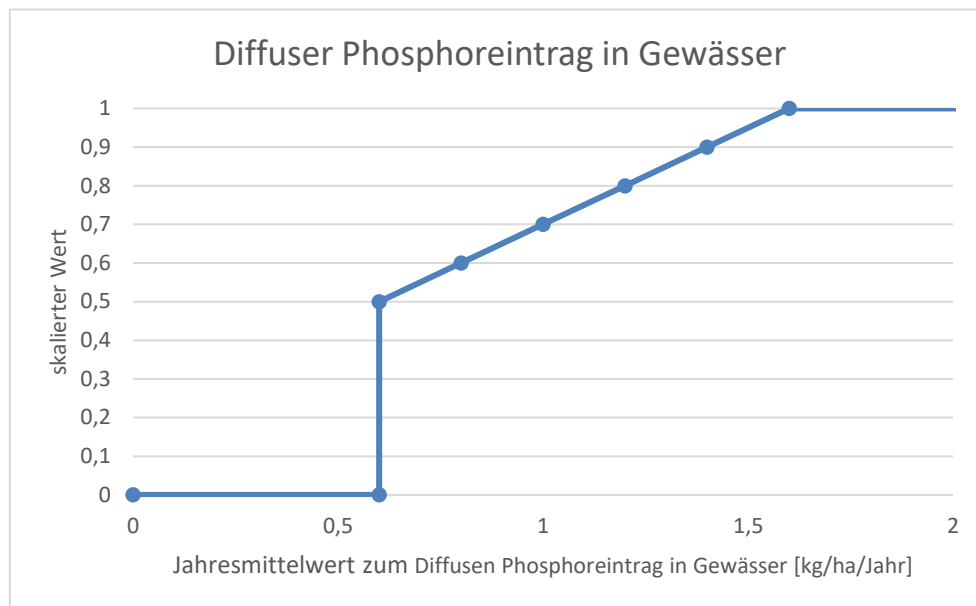


Abbildung 4: Die Utilityfunktion für den Diffusen Phosphoreintrag in Gewässer wird durch den Richtwert von 0.6 kg/ha/Jahr und eine linear steigende Funktion nach dessen Überschreitung beschrieben. Alle Werte, die unterhalb des Grenzwerts liegen, werden gleich 0 gesetzt. Alle Werte oberhalb 1.6 kg/ha/Jahr erhalten den Maximalwert 1.

### 2.5.11. Bodeneigenschaften

Das Kriterium der Bodeneigenschaften bezieht sich auf die Teilziele „Boden: Bodenerosion 1, 2 und 3 und Bodenverdichtung“ der UZL. Zum Stand der Zielerreichung 2016 heisst es u.a., dass bei punktuellen Erhebungen Richtwertüberschreitungen für Erosion auftreten und die Bodenfruchtbarkeit durch Erosion beeinträchtigt ist. Zur Bodenverdichtung können aufgrund von fehlenden Angaben im Statusbericht keine Aussagen getroffen werden (BAFU & BLW 2016). Auch auf die Beeinträchtigung des natürlichen Produktionspotentials und auf den ressourcenschonenden und ressourceneffizienten Umgang in der Landwirtschaft (BAFU & BLW, 2016) wird mit dem Kriterium Bezug genommen.

Durch die Leistung von AFS, die Bodenfruchtbarkeit zu steigern (García de Jalón et al. 2018, Herzog 2011, Kay et al. 2008, McAdam et al. 2009, Nair et al. 2010, Palma et al. 2007, Seitz et al. 2017, Sutter et al. 2017, Torralba et al. 2016), die Erosion zu vermindern (Herzog 2011, Jose 2009, Kaeser et al. 2011, Palma et al. 2007, Torralba et al. 2016) und nachhaltige, sichere und hohe Erträge zu erbringen (Eichhorn et al. 2006, Jose 2009, Kaeser et al. 2010a, Herzog 2011, Nair et al. 2010, Surböck, et al. 2005) sowie die Resistenz und Resilienz von Landwirtschaftssystemen zu steigern (Kay et al 2019b), kann ein Beitrag zur Erreichung dieser Teilziele geleistet werden.

Die Bewertung der landwirtschaftlichen Nutzungseignungen, welche die Utilityfunktion der Bodeneigenschaft ergibt, ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Die Utilityfunktion der Bodeneigenschaft wird aus der landwirtschaftlichen Nutzungseignung (LNE) der Parzelle abgeleitet. Neben den konkreten LNE werden Parzellen, die nicht klar klassifiziert werden können, vom Kanton in Bereiche eingeteilt. Das Potential der Bereiche wird aus dem gemittelten Wert aller im Bereich liegenden Nutzungseignungen errechnet.

Nutzungscode	Nutzungseignung	Potential
1	Uneingeschränkte Fruchtfolge 1. Güte	0.1
2	Uneingeschränkte Fruchtfolge 2. Güte	0.15
3	Getreidebetonte Fruchtfolge 1. Güte	0.25
4	Getreidebetonte Fruchtfolge 2. Güte	0.35
5	Futterbaubetonte Fruchtfolge	0.5
6	Futterbau bevorzugt, Ackerbau stark eingeschränkt	0.7
7	Gutes bis mässig gutes Wies- und Weideland	0.85
8	Wiesland (wegen Nässe nur zum Mähen geeignet)	1
9	Extensives Wies- und Weideland	1
10	Streueland	1
1-5	Bereich 1-5	0.27
2-5	Bereich 2-5	0.31
7-10	Bereich 7-10	0.96

Der gewählte Ansatz soll den bodenverbessernden Ökosystemleistungen von Agroforstsystemen (AFS) Rechnung tragen. Der Humusgehalt, die Bodenfruchtbarkeit, die Erosionsgefahr oder die Wasserverfügbarkeit sind limitierende Faktoren eines Standorts. Diese Faktoren haben Einfluss auf die Nutzungseignung der Parzelle. Wenn Bodenverbesserungen durch AFS erreicht werden, können die ehemals limitierten Flächen anderen Nutzungen zur Verfügung stehen und zur Produktionssicherheit und –souverenität der Schweiz beitragen, welche in den Umweltzielen Landwirtschaft (BAFU & BLW, 2016) gefordert werden.

## 2.5.12. Standortbelastung

Das Kriterium der Standortbelastung bezieht sich auf das Teilziel „Boden: Schadstoffe im Boden“ der UZL. Zum Stand der Zielerreichung 2016 heisst es u.a.: „Die Bodenfruchtbarkeit und die menschliche Gesundheit sind an einzelnen Standorten durch anorganische Schadstoffe gefährdet. Auf Grund von Wissenslücken ist keine umfassende Aussage zur Zielerreichung möglich.“ (BAFU & BLW 2016) und „An einzelnen Standorten werden Kupfer und Zink akkumuliert.“ (BAFU & BLW 2016)

Gewisse Bäume (beispielsweise Weiden oder Pappeln), aber auch andere Pflanzen (wie Hyperakkumulatoren aus den Ordnungen der Celastrales, Oxalidales, Malpighiales und Gentianales (Jaffré et al. 2013)), haben das Potential Schadstoffe aus dem Boden aufzunehmen und in der Biomasse zu speichern (Jaffré et al. 2013) oder den Abbau der Schadstoffe zu beschleunigen (Larsen et al. 2001). Die Bepflanzung der belasteten Standorte könnte somit eine Zwischennutzung darstellen, um die Anbaubedingungen für die landwirtschaftliche Nutzfläche zu verbessern und einen Beitrag zur Erreichung der Teilziele zu leisten.



Die Utilityfunktion zur Standortbelastung wurde bereits bei der Aufbereitung der Grundlagedaten angewendet. Dabei wurden alle Standorte mit einem Altlaststatus von 4 (überwachungspflichtig) oder 5 (sanierungspflichtig) als geeignet (Wert 1) und alle restlichen Standorte als ungeeignet (Wert 0) gewertet (s. 2.3.7. Standortbelastung).

### 2.5.13. Wasserverfügbarkeit für Pflanzen

Das Kriterium der Wasserverfügbarkeit für Pflanzen bezieht sich auf die im Statusbericht 2016 angesprochenen Auswirkungen des Klimawandels (BAFU & BLW, 2016). Durch Trockenheit wird der Druck auf die landwirtschaftlichen Grundlagen wie Boden und Wasser gesteigert.

Durch die Leistung von AFS, den Wasserhaushalt auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche zu regulieren, den Oberflächenabfluss zu vermindern, die Wasserspeicherkapazität zu erhöhen und die Verdunstung zu regulieren, kann ein Beitrag zur Einhaltung der Teilziele geleistet werden. (Anderson et al. 2009, Sanchez & McCollin 2015, Siriri et al. 2013)

Die Utilityfunktion zur Wasserverfügbarkeit für Pflanzen wird auf den aufbereiteten Raster-Layer angewandt. Alle Rasterzellen, welche einen Wert oberhalb des Richtwerts zum Verhältnis der aktuellen und potentiellen Evapotranspiration von 0.8 (Remund 2015) haben, werden als ungeeignet eingestuft und erhalten den Wert 0. Der Richtwert repräsentiert den Übertritt zum Umweltdefizit, weshalb von einem schon bestehenden Potential von 0.5 ausgegangen wird. Für die Werte, die unter dem Richtwert liegen, wird ein linearer Abfall des skalierten Werts angenommen (Abbildung 5). Liegt der Jahresmittelwert unter 0.8 werden Beeinträchtigung der Photosynthese erwartet (Remund 2015).

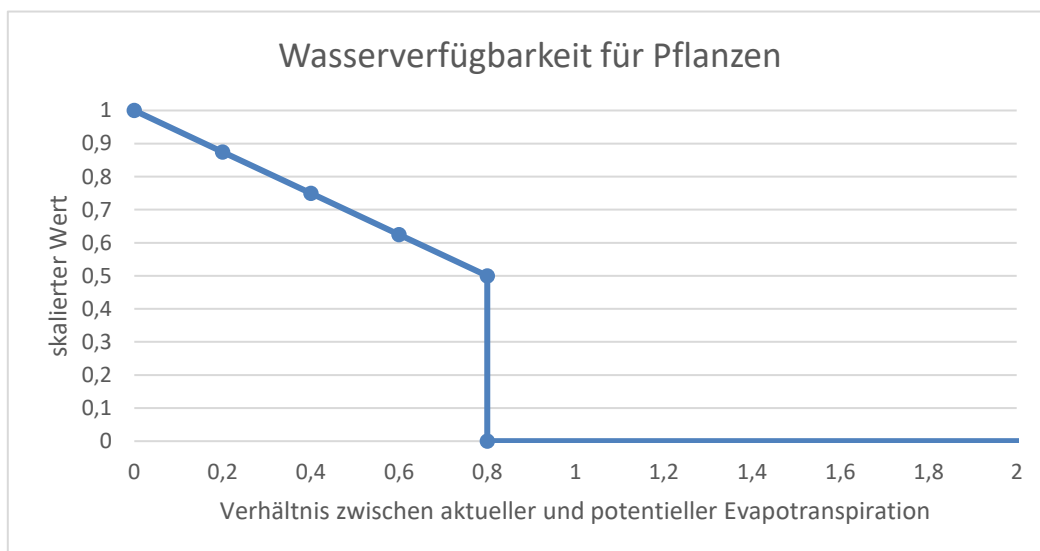


Abbildung 5: Die Utilityfunktion für die Wasserverfügbarkeit der Pflanzen wird durch den Richtwert von 0.8 zum Verhältnis der aktuellen und der potenziellen Evapotranspiration beschrieben. Alle Werte, die unterhalb des Richtwerts liegen, werden durch eine linear fallende Funktion berechnet. Die Werte oberhalb des Richtwerts erhalten den Minimalwert 0.

## 2.6. Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse wurde für das Ranking, die Gewichtung, die Utilityfunctions und die Utilityfunction des am stärksten gewichteten Kriteriums (Bodeneigenschaften) durchgeführt. Diese wurden ausgewählt, um Stärken oder mögliche Limitierungen der Ansätze und der Methodik aufzuzeigen und Verbesserungen zu ermöglichen. Des Weiteren wurde eine Sensitivitätsanalyse für den Ausschluss des stark korrelierenden Kriteriums Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>) angestellt.

### 2.6.1. Sensitivität des Rankings

Für die Sensitivitätsanalyse des Rankings wurde der Vergleich zwischen dem summierten und dem reziproken Ranking angestellt. Das reziproke Ranking wird durch die Formel 2 beschrieben.

$$\text{Formel 2: } w_j = \frac{\frac{1}{r_j}}{\sum \left(\frac{1}{r_k}\right)}$$

Dabei steht „w<sub>j</sub>“ für das standardisierte Gewicht des Kriteriums „j“, „r<sub>j</sub>“ ist der Rang des Kriteriums „j“ im Ranking und „k“ ist mit „k = 1, ..., n“ die Laufvariable der Anzahl Kriterien („n“). Jedes Kriterium wird durch die Formel mit der Funktion „1/r<sub>j</sub>“ gewichtet und durch die Summe aller Gewichte  $\sum \frac{1}{r_k}$  normalisiert. (Grêt-Regamey & Van Strien 2019)

Das reziproke Ranking verteilt das Gewicht der Kriterien so, dass die ranghohen Kriterien mehr Gewicht bekommen und die Kriterien mit tieferen Rängen weniger stark voneinander abweichen. Dadurch bekommen auch die tiefsten Ränge mehr Gewicht (Abbildung 6).

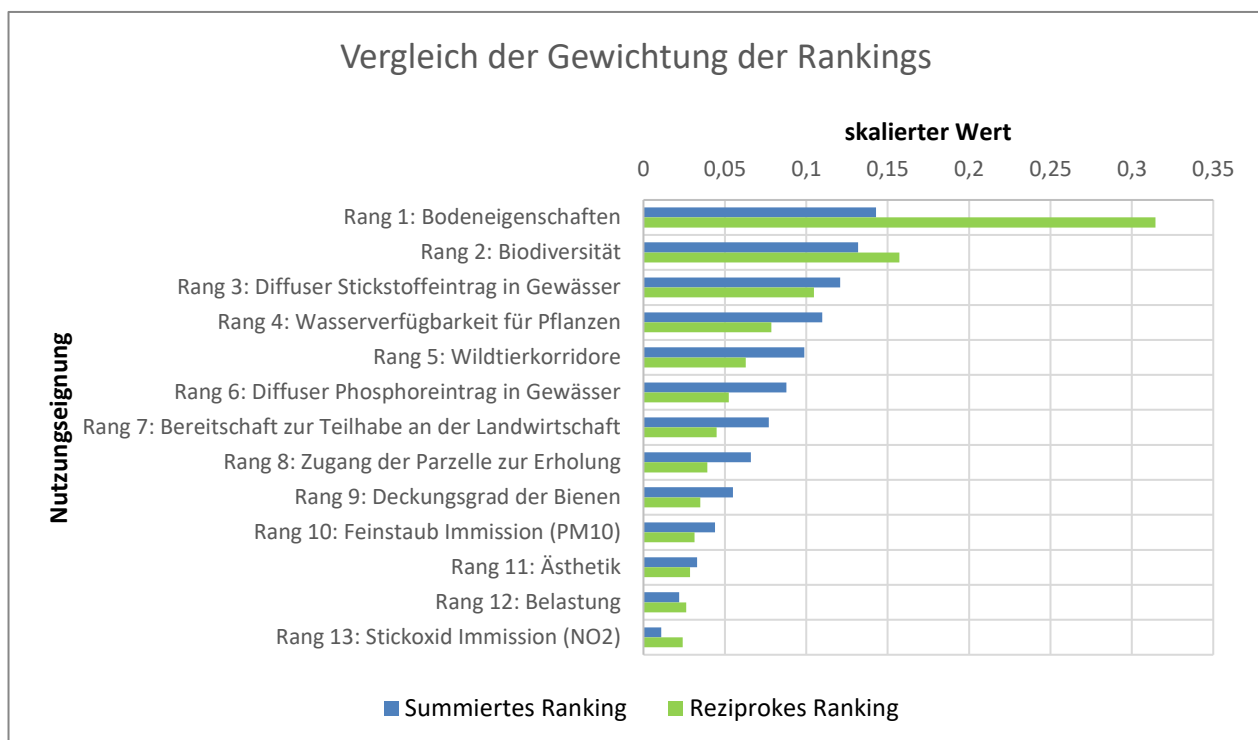


Abbildung 6: Dargestellt werden die skalierten Werte der landwirtschaftlichen Nutzungsseignungen zu dem summierten und dem reziproken Ranking.

## 2.6.2. Sensitivität der Gewichtung

Für die Sensitivitätsanalyse der Gewichtung wurde der Vergleich zwischen dem Resultat mit Gewichtung und ohne Gewichtung der Experten durchgeführt. Bei der Variante ohne die Gewichtung der Experten werden alle Kriterien gleich stark gewichtet und erhalten für die Überlagerung der Kriterien alle den Wert 1/13.

## 2.6.3. Sensitivität der Utilityfunctions

Für die Sensitivitätsanalyse ohne Utilityfunctions musste trotzdem eine Normierung der Kriterien zur Vergleichbarkeit durchgeführt werden. Dabei wurden alle Werte unterhalb der verwendeten Richtwerte für den jeweiligen Layer gleich 0 und alle Werte über dem Richtwert auf den Wert 1 gesetzt. Im Folgenden wird die Normierung zu den einzelnen Kriterien beschrieben:

- Für die Wildtierkorridore, den Deckungsgrad der Biene, die Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft, die Standortbelastung und die Biodiversität bleibt der Layer gleich, da dessen Normierungen nur die Werte 0 und 1 vorsehen.
- Die Werte der metrisch skalierten Layern (Feinstaub Immission (PM10), Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>), Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer, Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer und Wasserverfügbarkeit für Pflanzen), welche den jeweiligen Richtwert/Grenzwert überschreiten, werden auf den Wert 1 gesetzt, alle anderen auf 0.
- Für die Ästhetik wurde ein Richtwert von 0.5 verwendet, da die Flächen mit darüberliegenden Werten im Vergleich zu den übrigen Flächen als intensiver bewirtschaftet und ökologisch weniger wertvoll eingestuft werden können.
- Für den Zugang der Parzelle zur Erholung wurden alle Potentialwerte die ungleich 0 sind mit 1 bewertet. Der Zugang zur Parzelle wird somit für alle Flächen als gegeben angenommen, die unter 1500 m vom Siedlungsgebiet entfernt oder in das Wander- Reitwegenetz eingebunden sind.
- Für die Bodeneigenschaften wird ein Richtwert von 0.5 angenommen, da angenommen wird, dass die Flächen mit einem höheren Wert, Limitierungen durch die Bodeneigenschaften aufweisen und die Nutzungseignung somit einschränken. Dadurch entsteht auf diesen Flächen ein erhöhtes Potential die Bodeneigenschaften zu verbessern.

## 2.6.4. Sensitivität zum Ausschluss eines stark korrelierenden Kriteriums

Die Korrelation der Kriterien wurde mittels Pearson- und Spearman-Korrelation berechnet. Für Kriterien mit metrisch verteilten Werten wurde die Pearson-Korrelation (Cohen 1992) verwendet. Für die Kriterien mit ordinal verteilten Werten und zur Berechnung der Korrelation zwischen Kriterien mit metrisch und ordinal verteilten Werten fand die Spearman-Korrelation Anwendung (Cohen 1992).

## 2.6.5. Sensitivität zur Utilityfunction der Bodeneigenschaften

Für die Sensitivitätsanalyse zur Utilityfunction der Bodeneigenschaften wurde zum Vergleich die Utilityfunction der Bodeneigenschaften verändert (Tabelle 5). Die Nutzungseignungen, welche auf intensive Bewirtschaftungen ausgerichtet sind, werden mit einem hohen Potential versehen. Die Parzellen mit extensiverer Bewirtschaftung erhalten ein tiefes Potential. Durch diese Sensitivitätsanalyse wird das Kriterium der Bodeneigenschaften von einer Umweltverbesserung zu einem Umweltdefizit. Diese Veränderung erreicht, dass der Fokus auf die zu mildernden Umweltdefizite, die durch die Landwirtschaft verursacht werden, gelegt wird und nicht primär darauf, eine Verbesserung der Bodeneigenschaften hervorzurufen.

Tabelle 6: Die Utilityfunction der Bodeneigenschaften und die Veränderung der Utilityfunction der Bodeneigenschaften im Vergleich.

Nutzungscode	Nutzungseignung	Potential	Potential der veränderten Utilityfunction
1	Uneingeschränkte Fruchtfolge 1. Güte	0.1	1
2	Uneingeschränkte Fruchtfolge 2. Güte	0.15	1
3	Getreidebetonte Fruchtfolge 1. Güte	0.25	1
4	Getreidebetonte Fruchtfolge 2. Güte	0.35	1
5	Futterbaubetonte Fruchtfolge	0.5	0.5
6	Futterbau bevorzugt, Ackerbau stark eingeschränkt	0.7	0.5
7	Gutes bis mässig gutes Wies- und Weideland	0.85	0.25
8	Wiesland (wegen Nässe nur zum Mähen geeignet)	1	0.15
9	Extensives Wies- und Weideland	1	0.1
10	Streueland	1	0.1
1-5	Bereich 1-5	0.27	0.9
2-5	Bereich 2-5	0.31	0.875
7-10	Bereich 7-10	0.96	0.15

## 3. Resultate

### 3.1. Literaturrecherche

Bei der Literaturrecherche zu Agroforstsystemen (AFS) wurden Informationen zu den Definitionen, Klassifizierungen und Ökosystemleistungen der AFS zusammengetragen. Mit dem Überblick über die AFS konnte dann das Konzept der Kriterien erarbeitet werden, um die Standortbedingungen der landwirtschaftlichen Nutzflächen zu beschreiben.

#### 3.1.1. Definition Agroforstsystem

Die Definition von Agroforstsystemen nach Vogt (1999) lautet wie folgt:

„Agroforstwirtschaft ist eine Form der Landnutzung, bei der mehrjährige Holzpflanzen [...] willentlich auf der selben [sic] Fläche angepflanzt werden, auf der auch landwirtschaftliche Nutzpflanzen angebaut und / oder Tiere gehalten werden. Diese Elemente können entweder in räumlicher Anordnung oder in zeitlicher Abfolge kombiniert werden.“

Das heisst, AFS sind Bewirtschaftungssysteme, welche die Praktiken der Land- und Forstwirtschaft auf derselben Landnutzungsfläche umsetzen (Mosquera-Losada et al. 2009, Palma 2006).

#### 3.1.2. Klassifizierung von Agroforstsystemen

Dupraz et al. (1997) und Böhm et al. (2018) teilen die Agroforstsysteme (AFS) in Europa in vier Systeme ein:

- Silvopastorales System: Dieses AFS kombiniert Gehölze mit Weideland für Nutztiere auf der gleichen landwirtschaftlichen Bewirtschaftungseinheit (LWB).
- Silvoarables System: Dieses AFS kombiniert Gehölze mit Ackerkulturen auf der gleichen LWB.
- Agrosilvopastorales System: Dieses AFS kombiniert das Silvopastorale und des Silvoarable Systems, d.h. die Gehölze werden mit Ackerkulturen und Weideland auf der gleichen LWB kombiniert.
- Lineares System: Dieses AFS verwendet Gehölzstreifen zur Trennung von zwei Bewirtschaftungseinheiten oder als Grenze zu einer anderen Flächeneinheit, beispielsweise zu einem Gewässer (Gewässerrandstreifen) oder zu anderen Kulturen (Feldgassenackerbau). Ein weiterer Anwendungsbereich des Linearen Systems sind Windschutzstreifen.

Die vier Systeme haben unterschiedliche Schwerpunkte und Eigenschaften. Für diese Arbeit wurde angenommen, dass alle Ökosystemleistungen gleichermassen von allen Systemen bereitgestellt werden können, um die Umweltdefizite zu mildern und die Umweltverbesserungen zu steigern (Torralba et al. 2016).

### 3.1.3. Ökosystemleistungen von Agroforstsystemen

Agroforstsysteme (AFS) sind multifunktionale Bewirtschaftungsmethoden, welche eine Vielzahl von Ökosystemleistungen (ÖSL) bereitstellen können und die Biodiversität erhöhen (García de Jalón et al. 2018, Eichhorn et al. 2006, Jose 2009, Kaeser et al. 2011, Torralba et al. 2016). Im Folgenden werden einige der ÖSL von AFS aufgelistet:

- Bereitstellung von Ressourcen: Holz, Nahrung, Biomasse (Fagerholm et al. 2016, Herzog 2011, Kaeser et al. 2011, McAdam et al. 2009)
- Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit (García de Jalón et al. 2018, Herzog 2011, Kay et al. 2008, McAdam et al. 2009, Nair et al. 2010, Palma et al. 2007, Seitz et al. 2017, Sutter et al. 2017, Torralba et al. 2016)
- Verminderung der Erosion (Herzog 2011, Jose 2009, Kaeser et al. 2011, Palma et al. 2007, Torralba et al. 2016)
- Erbringen von nachhaltigen, sicheren und hohen Erträgen (Eichhorn et al. 2006, Jose 2009, Kaeser et al. 2010a, Herzog 2011, Nair et al. 2010, Surböck, et al. 2005)
- Positive Wirkung auf das Mikroklima (Nair et al. 2010, Torralba et al. 2016)
- Milderung der Klimaveränderungen mittels Kohlenstoffspeicherung (Cardinael et al. 2017, Fagerholm et al. 2016, Herzog 2011, Kaeser et al. 2011, McAdam et al. 2009, Torralba et al. 2016)
- Einflussnahme auf die Nährstoffzyklen (Manevski et al. 2019, McAdam et al. 2009, Nair et al. 2010, Torralba et al. 2016, Wolz et al. 2018)
- Regulierung des Wassers: Abfluss- & Qualitätsregulation (Herzog 2011, Kaeser et al. 2011, McAdam et al. 2009, Palma et al. 2007, Surböck, et al. 2005)
- Resistenz- und Resilienzsteigerung des Landwirtschaftssystems (Kay et al 2019b)
- Förderung der Erholungsleistung und der Ästhetik (Eichhorn et al. 2006, Herzog 1998, McAdam et al. 2009)

### 3.1.4. Konzept zur Einteilung der Kriterien

Für die Beschreibung der landwirtschaftlichen Nutzflächen wurde ein Konzept entwickelt, welches die Inputs, Outputs, Grundbedingungen und Wechselwirkungen einer Parzelle darstellt (Abbildung 7). Die 13 Kriterien werden vier Kategorien zugeteilt, welche die Standortbedingungen der Parzelle beschreiben: Grundbedingungen der Parzelle; Auswirkungen auf die Umwelt; Wahrnehmung, Erholung, Zugänglichkeit und Biodiversität; Äussere Einflüsse.

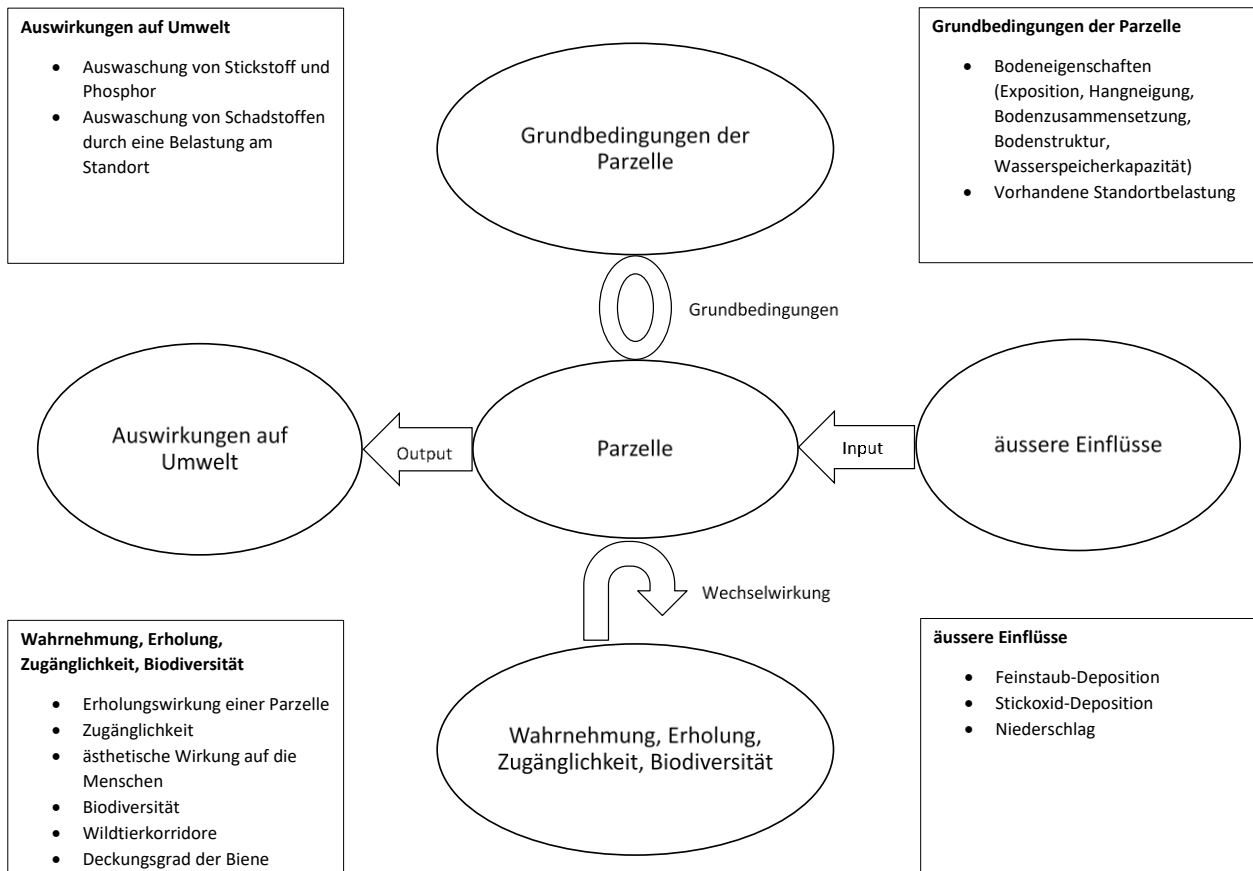


Abbildung 7: Standortbedingungen einer landwirtschaftlichen Nutzfläche mit den Inputs, Outputs, Grundbedingungen und Wechselwirkungen.

Die Umweltdefizite beziehen sich auf Teilziele der „Umweltziele Landwirtschaft“ (UZL), bei welchen eine Überschreitung von Grenz- oder Richtwerten auftritt und somit von einer Schädigung der Umwelt ausgegangen werden kann. Die Grenz- und Richtwerte wurden der Literatur und der gesetzlichen Grundlage entnommen. In den Fällen, in denen keine Richtwerte zur Verfügung standen, wurden eigenen Richtwerte erstellt. Die in dieser Arbeit berücksichtigten Kriterien, für die Richtwerte bestehen, sind der Diffuse Stickstoffeintrag in Gewässer, der Diffuse Phosphoreintrag in Gewässer und die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen. Gesetzliche Grenzwerte gelten für die Feinstaub Immission (PM10) und die Stickoxid Immission (NO2).

Umweltverbesserungen stehen für die Möglichkeit, den bestehenden Zustand der landwirtschaftlichen Parzelle bezogen auf ein nicht erreichtes Teilziel der UZL zu verbessern. Zu den UV gehören folgende Kriterien: Wildtierkorridore, Deckungsgrad der Biene, Bodeneigenschaften, Ästhetik, Zugang der Parzelle zur Erholung, Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft und Biodiversität. Für diese Kriterien wurden eigene Ansätze entwickelt, um das Potential zu quantifizieren, da keine Grenz- oder Richtwerte zur Verfügung stehen.

Diese Unterscheidung zwischen UD und UV wird angestellt, um den Unterschied zwischen der Ausrichtung der Kriterien zu verdeutlichen. Bei den Umweltdefiziten geht es um die Milderung

einer Schädigung der Umwelt. Bei den Umweltverbesserungen geht es hingegen um ein ungenutztes Potential oder eine Möglichkeit den Standort aufzuwerten und zusätzlichen Ökosystemleistungen bereitzustellen.

## 3.2. Multi-Objektive-Entscheidungen

### 3.2.1. Ranking der Kriterien

Die Auswertung der Experteninterviews ist in Tabelle 7 dargestellt. Diese zeigt die Häufigkeit der von den Experten für die jeweiligen Kriterien erteilten Ränge. Die Rangordnungen der einzelnen Experten sind in Tabelle 9 im Anhang ersichtlich. Die ermittelte Rangordnung aus den neun Experteninterviews ergibt sich aus der folgenden Formel:

$$\text{Formel 3: } \text{Rang} = \frac{\sum(\text{Häufigkeit des zugeteilten Rangs} \cdot \text{Rang})}{\text{Anzahl Experten}}$$

Tabelle 7: Häufigkeit des zugeteilten Rangs der Experten-Rangordnung. Das Zeichen  $\Theta$  stellt den berechneten Wert zum Rang dar. Zusätzlich wird der Rang der Kriterien aufgeführt.

Kriterium	Zugeteilter Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	$\Theta$	Rang
Bodeneigenschaften		4	2		1		1	1							2.8	1
Biodiversität		2		3	1	2		1							3.6	2
Diff. Stickstoffeint. in Gew.		1	1	2	1		1	2					1		5.0	3
Wasserverf. für Pflanzen		1	1	1		1	1	2			1			1	6.0	4
Wildtierkorridore		1	1			1	2	1	1	1		1			6.1	5
Diff. Phosphoreint. in Gew.			1		1	1	1	1	1		2	1			7.0	6
Bereitschaft zur Teilhabe an der LW				1	2	1			3		1			1	7.0	7
Zugang der Parzelle zur Erholung					1	1	1			4		1	1		8.2	8
Deckungsgrad der Bienen				2		1			1	2		2	1		8.4	9
Feinstaub Immission (PM10)					1		2		1	3			1	1	8.4	10
Ästhetik		1		1				1	1		1	2	1	1	8.7	11
Standortbelastung		2							1			3	2	1	9.1	12
Stickoxid Immission (NO2)						1				1	2	1	1	3	10.7	13



### 3.3. Potential von Agroforstsystemen zur Verbesserung der „Umweltziele Landwirtschaft“

Die Karte in Abbildung 8 zeigt das Potential von Agroforstsystemen zur Verbesserung der „Umweltziele Landwirtschaft“ im Kanton Zürich. Auf rund der Hälfte der landwirtschaftlichen Nutzfläche beträgt das Potential einen Wert von 0.45 oder mehr. Auf der Karte zeigt sich insbesondere im Nordosten und im Zentrum des Kantons Zürich ein gehäuftes Potential.

Zur genaueren Betrachtung der Resultate wurde eine Analyse der 1000 (Tabelle 10 und 11 im Anhang) und der 6894 (Tabelle 12 und 13 im Anhang) Parzellen mit dem höchsten Potential angestellt. Dabei konnte Folgendes festgestellt werden:

- Die Parzellen weisen eine eingeschränkte Nutzungseignung und dadurch Limitierungen für die Landwirtschaft auf. Für den Grossteil der Flächen können die Nutzungseignung „Futterbaubetonte Flächen“ und „Gutes bis mässig gutes Wies- und Weideland“ zugewiesen werden.
- Die Parzellen weisen eine niedrige Wasserverfügbarkeit für Pflanzen auf.
- Die Parzellen haben ein hohes Potential die Biodiversität zu verbessern.

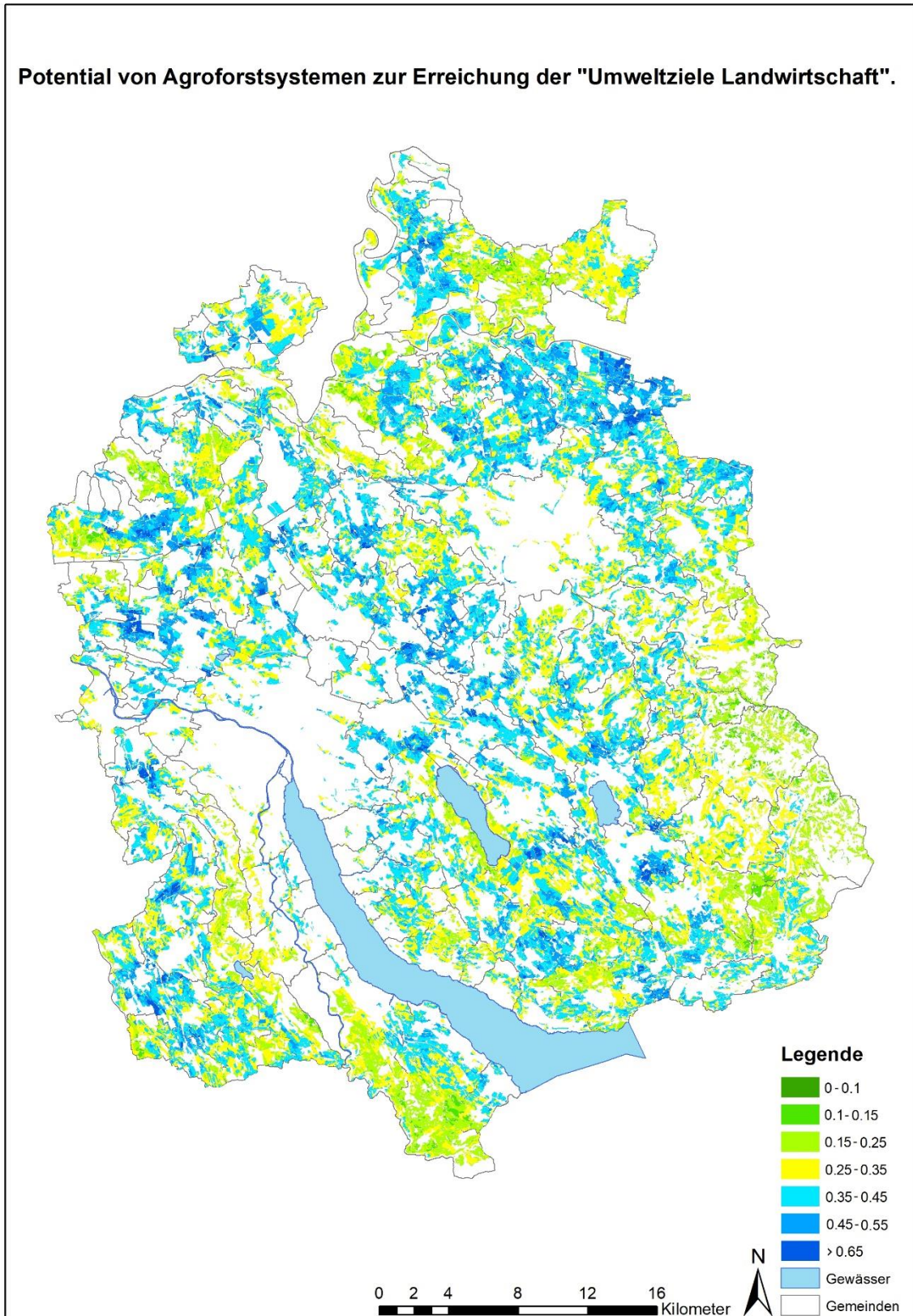


Abbildung 8: Potential von Agroforstsystemen zur Erreichung der „Umweltziele Landwirtschaft“ im Kanton Zürich.

### 3.4. Anzahl Umweltdefizite und Umweltverbesserungen pro Parzelle

In Abbildung 9 wird die Anzahl der Überlagerungen von Umweltdefizite (UD) und Umweltverbesserungen (UV) pro Parzelle angezeigt. Der Unterschied zur Potentialkarte in Abbildung 8 liegt darin, dass die skalierten Werte der Kriterien nicht summiert, sondern die Überschreitungen gezählt werden. Dies ermöglicht die Parzellen aufzuzeigen, auf welchen ein breites Spektrum an UD und UV überlagern (Tabelle 14 und 15 im Anhang).

Bei einer Analyse der Parzellen mit mehr als neun UD und UV (Abbildung 10) konnte Folgendes festgestellt werden:

- Die Parzellen weisen mehrheitlich Nutzungseignungen mit guten Bodeneigenschaften und ohne Limitierungen auf. Die Nutzungseignungen „Uneingeschränkte Fruchtfolge 1. Güte“ und „Uneingeschränkte Fruchtfolge 2. Güte“ sowie „Getreidebetonte Fruchtfolge 1. Güte“ und „Getreidebetonte Fruchtfolge 2. Güte“ sind jeweils mit insgesamt rund 35% vertreten.
- Die Parzellen weisen eine niedrige Wasserverfügbarkeit für Pflanzen auf.
- Die Parzellen haben ein hohes Potential die Biodiversität zu verbessern.
- Die Parzellen haben einen mittleren Diffusen Stickstoffeintrag in Gewässer.

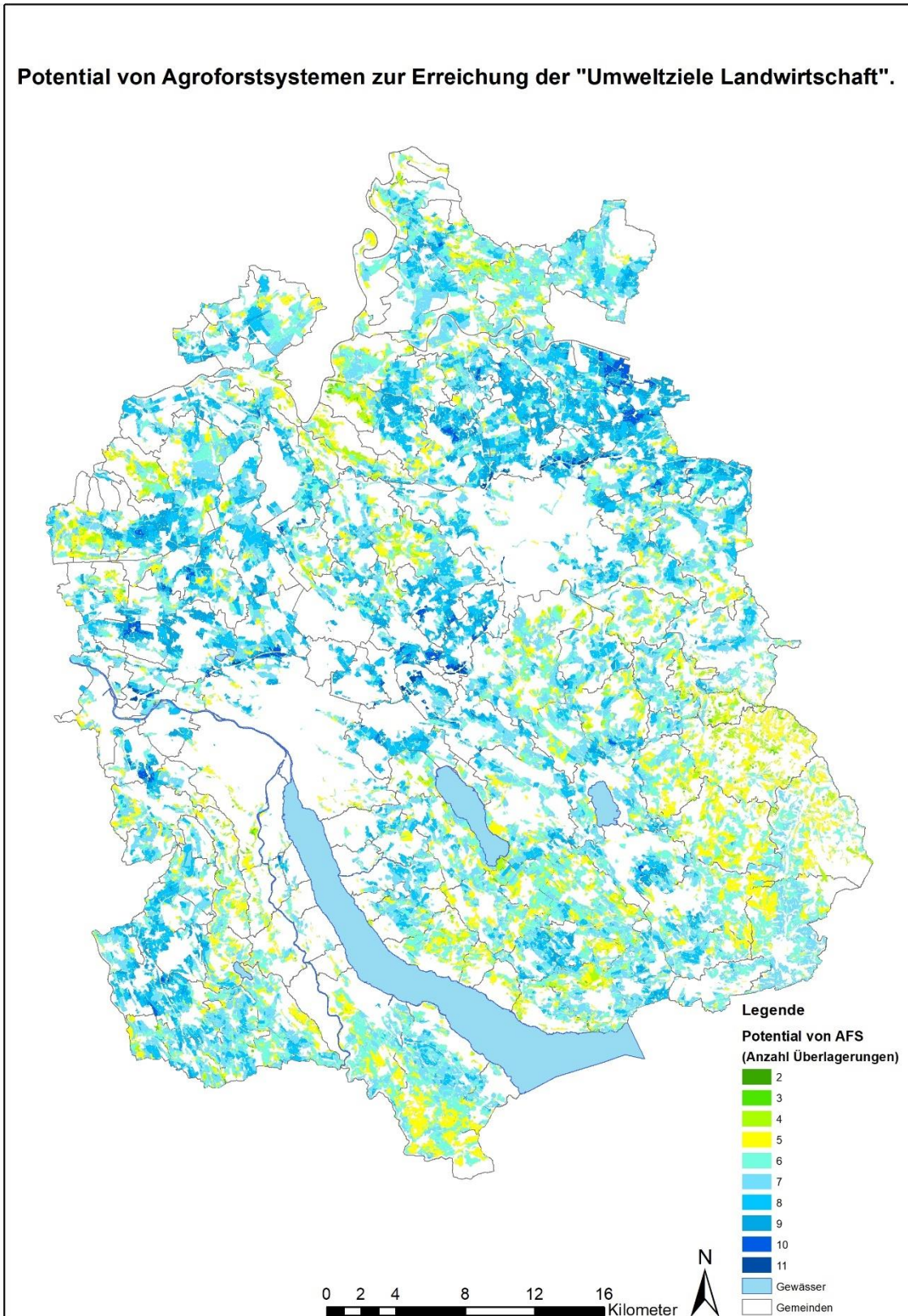


Abbildung 9: Anzahl der Überlagerungen von Umweltdefiziten und Umweltverbesserungen im Kanton Zürich.

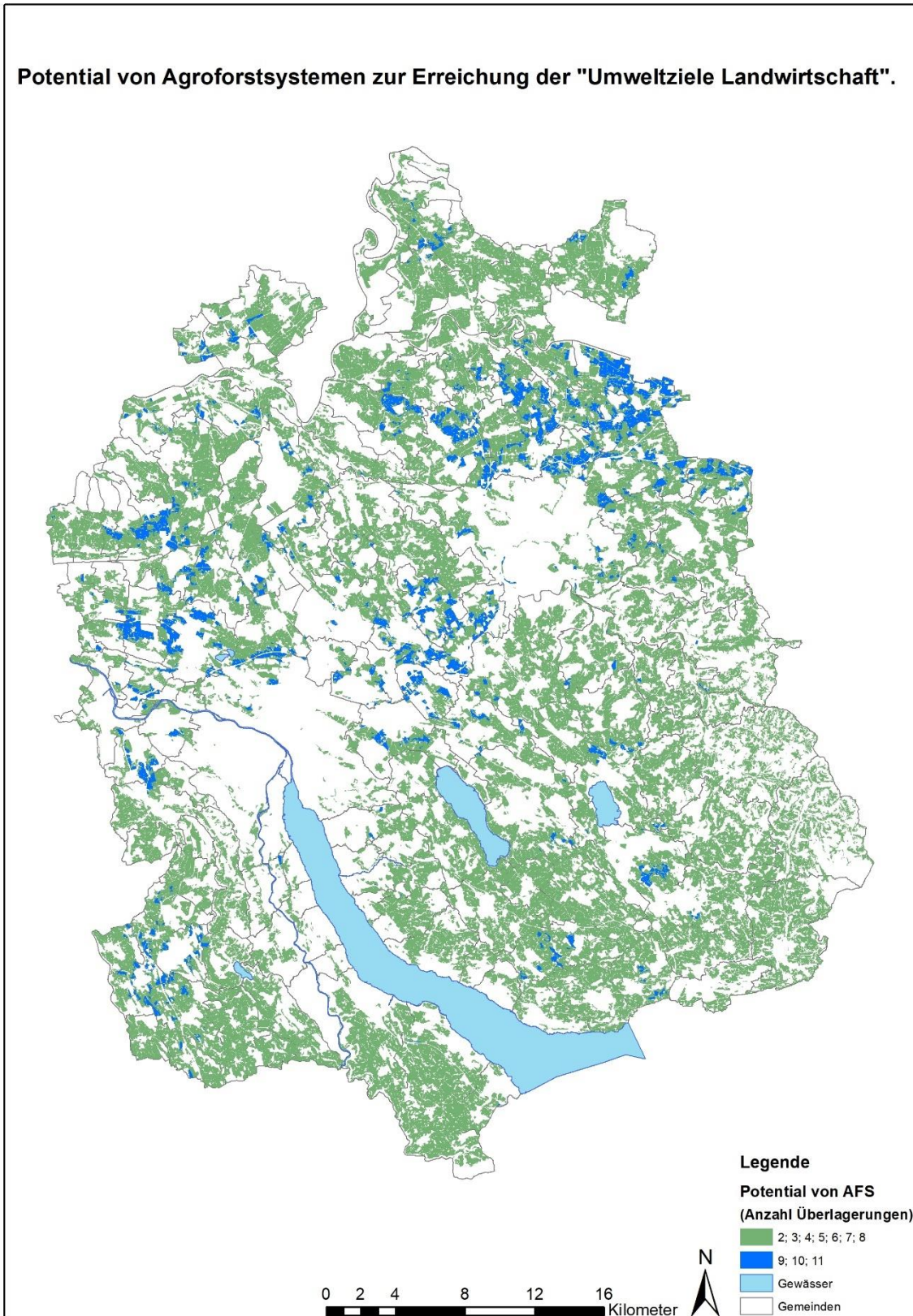


Abbildung 10: Anzahl der Überlagerungen von Umweltdefiziten und Umweltverbesserungen im Kanton Zürich. Landwirtschaftliche Nutzflächen mit neun oder mehr Überlagerungen von Umweltdefiziten und Umweltverbesserungen werden hervorgehoben.

## 3.5. Sensitivitätsanalyse

### 3.5.1. Sensitivität des Rankings

Das reziproke Ranking verteilt das Gewicht zugunsten der ranghöchsten Kriterien. Dadurch wird das Kriterium der Bodeneigenschaften mehr als doppelt so stark gewichtet (Abbildung 11) und das Potential der landwirtschaftlichen Parzellen zur Erreichung der UZL verändert (Abbildung 12). In der Karte zeigt sich im überwiegend durch Ackerbau geprägten Norden des Kantons Zürich eine Veränderung hin zu einer Verringerung des Potentials. Im überwiegend durch Futterbau, Wies- und Weideland geprägten Süden des Kantons Zürich vergrößert sich das Potential. Die Abbildung 13 quantifiziert die Differenz zwischen dem Resultat aus dem summierten und dem reziproken Ranking. Es kann aufgezeigt werden, dass das Ranking vor allem im Nordosten und Südosten des Kantons Zürich Einfluss hat. In Abbildung 21 wird die Sensitivität des Rankings dargestellt und mit den anderen Sensitivitätsanalysen verglichen.



Abbildung 11: Dargestellt sind die skalierten Werte der Kriterien zu dem summierten und dem reziproken Ranking. Das summierte Ranking weist eine lineare Verteilung auf, das reziproke Ranking gleicht einer exponentiellen Verteilung.

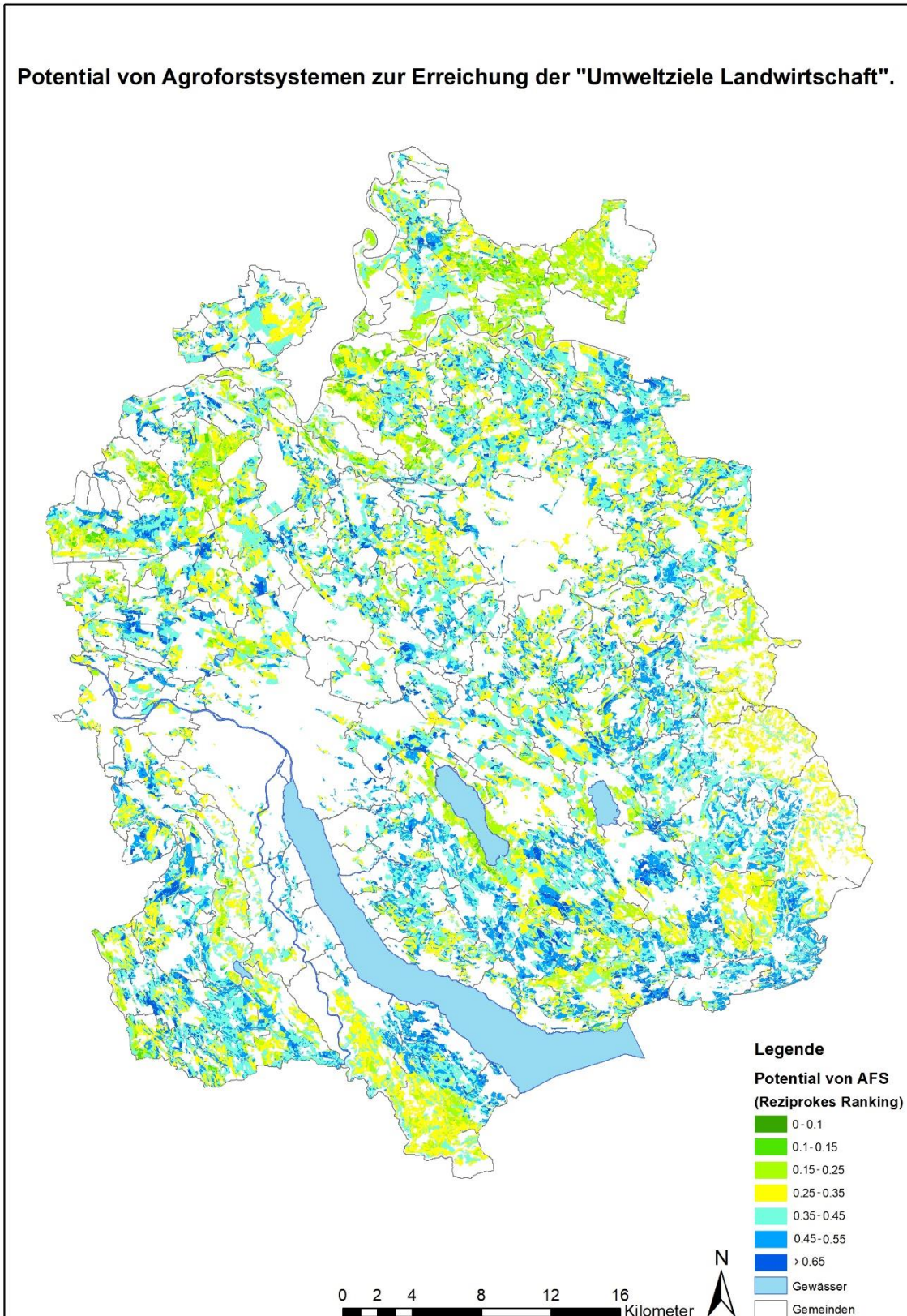


Abbildung 12: Potential von Agroforstsystemen im Kanton Zürich mit dem reziproken Ranking.

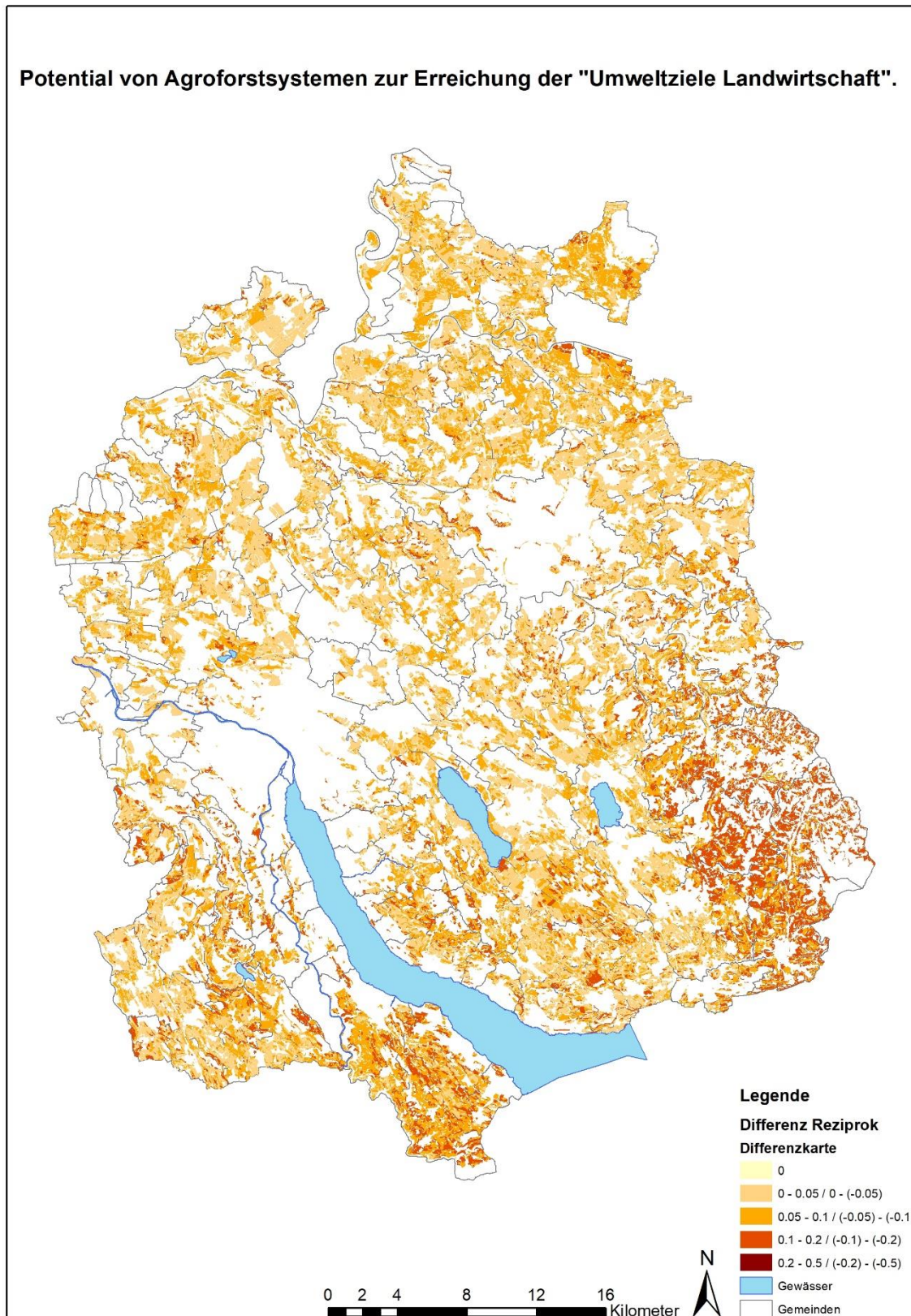


Abbildung 13: Differenzkarte zum summierten und zum reziproken Ranking.



### 3.5.2. Sensitivität der Gewichtung

Die Karte zum Potential von Agroforstsystemen ohne Expertengewichtung wird in Abbildung 14 dargestellt. Bei der Gegenüberstellung der Resultate mit und ohne Expertengewichtung kann eine Homogenisierung des Potentials durch das einheitliche Gewicht aller Kriterien aufgezeigt werden. Die Parzellen mit grossem oder sehr geringem Potential bleiben erkennbar. In der Differenzkarte (Abbildung 15) wird sichtbar, dass sich durch die Veränderung der Gewichtung das Potential vor allem im Südosten des Kantons Zürich ändert.

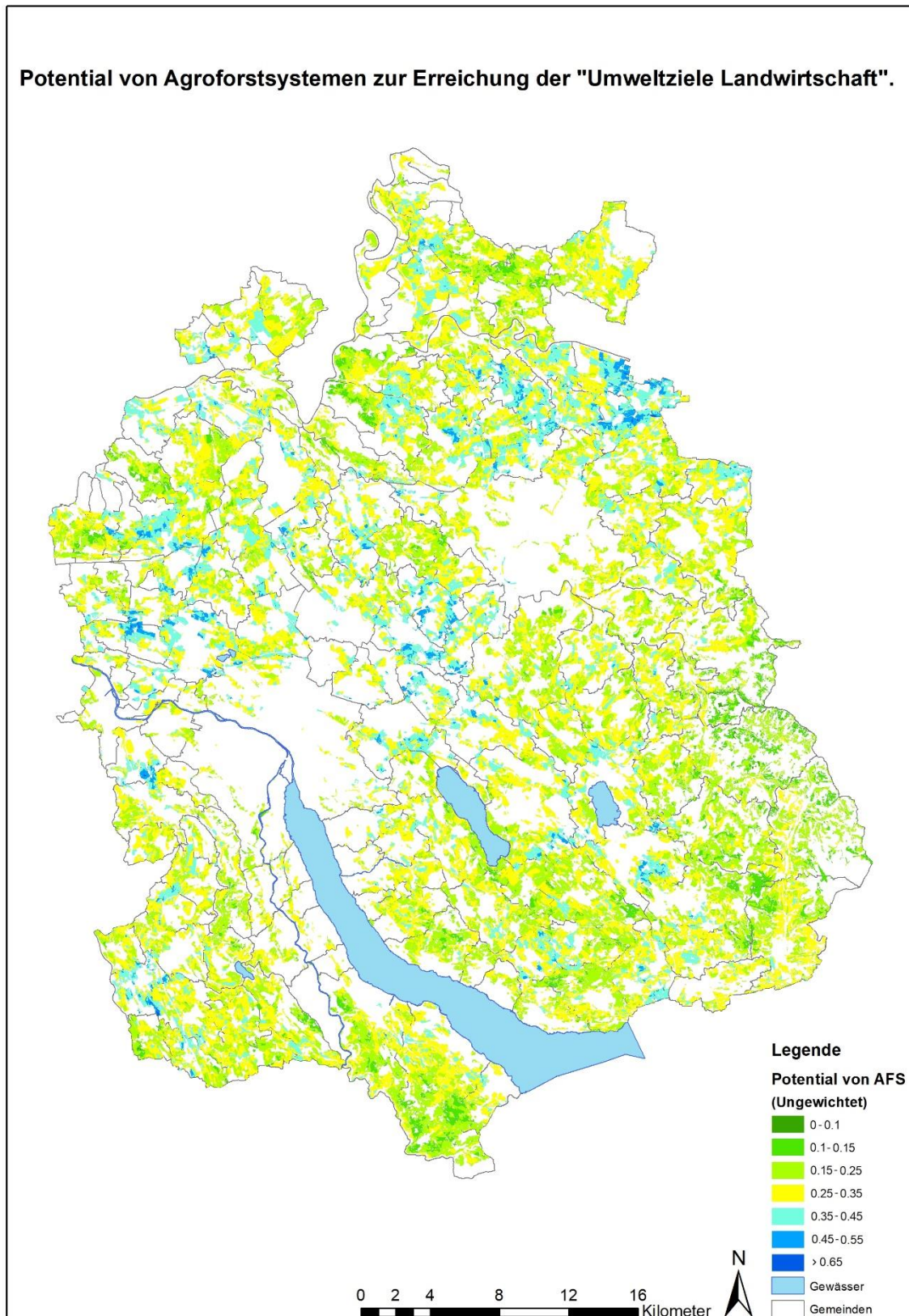


Abbildung 14: Potential der Parzellen im Kanton Zürich ohne Expertengewichtung.

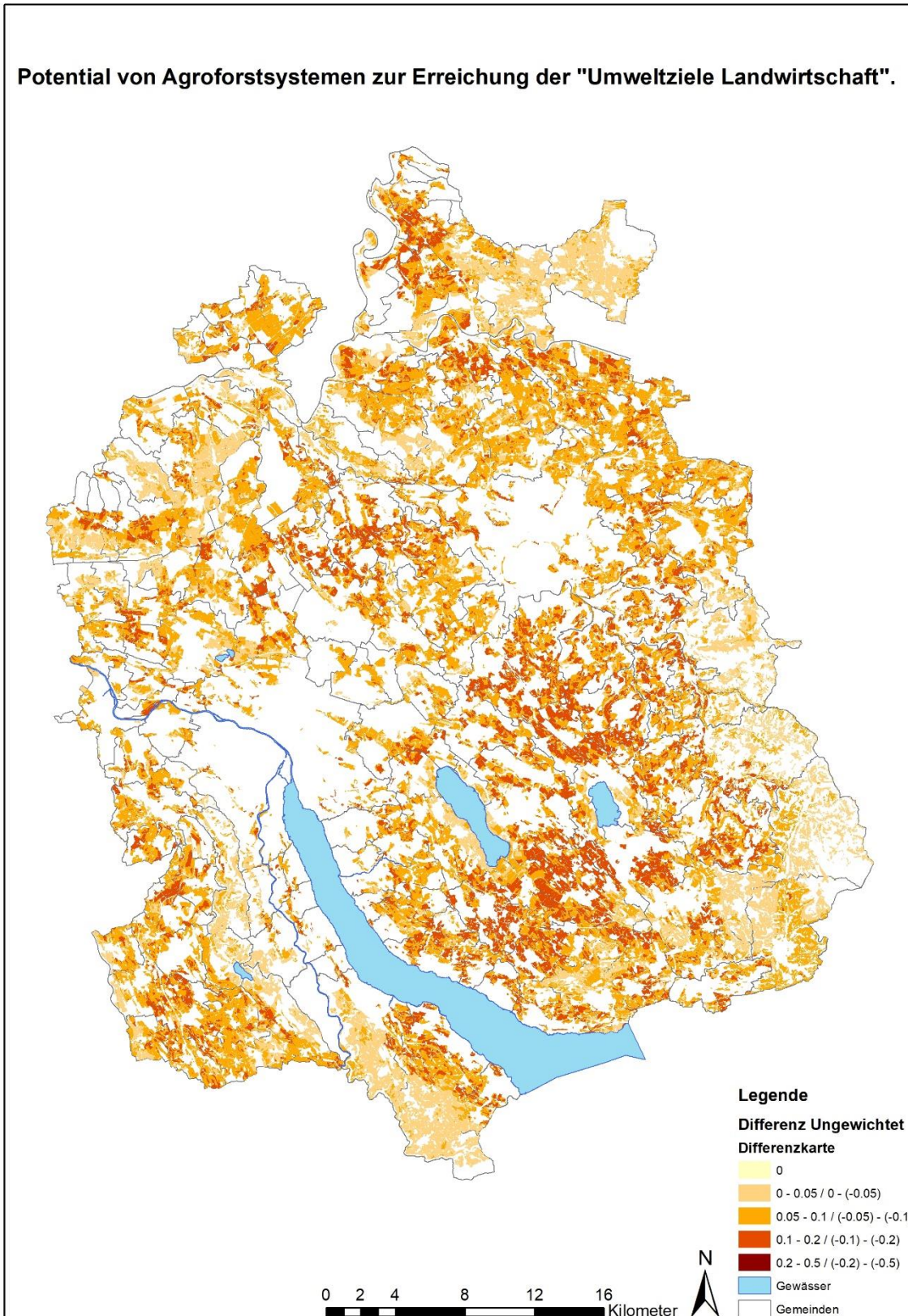


Abbildung 15: Differenzkarte zum gewichteten und ungewichteten Potential.

### 3.5.3. Sensitivität der Utilityfunctions

Die Karte zum Potential von Agroforstsystemen ohne Utilityfunctions wird in Abbildung 17 dargestellt. Bei der Gegenüberstellung der Resultate mit und ohne Utilityfunctions kann eine deutliche Erhöhung des Potentials aufgezeigt werden. Alle Kriterien werden in dieser Sensitivitätsanalyse auf die Werte 0 und 1 normiert (s. 2.6.3. Sensitivität der Utilityfunctions). Dies hat zur Folge, dass die Skalierung der jeweiligen Kriterien verschwindet und nur noch zwischen Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von Umweltdefiziten oder -verbesserungen unterschieden wird.

Die Kategorisierung der Kriterien in Abbildung 17 vereinheitlicht alle Parzellen mit einem Potential von über einem Wert von 0.6. Der Boxplot in Abbildung 16 zeigt, dass mehr als 25% der Werte über 0.6 liegen. Dies kann durch die Kategorisierung in Abbildung 17 nicht dargestellt werden, wird aber mit der Differenzkarte (Abbildung 18) verdeutlicht.

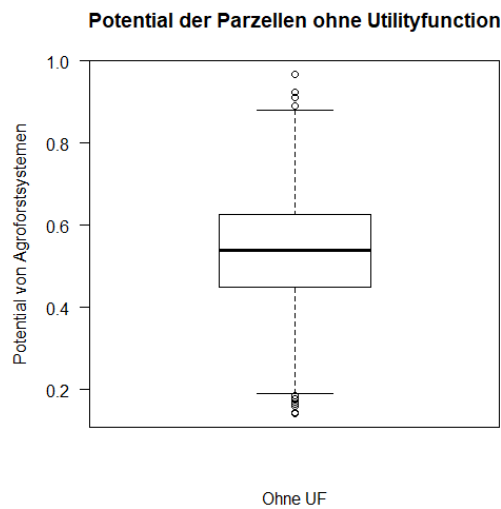


Abbildung 16: Verteilung des Potentials zur Sensitivitätsanalyse der Utilityfunctions (UF).

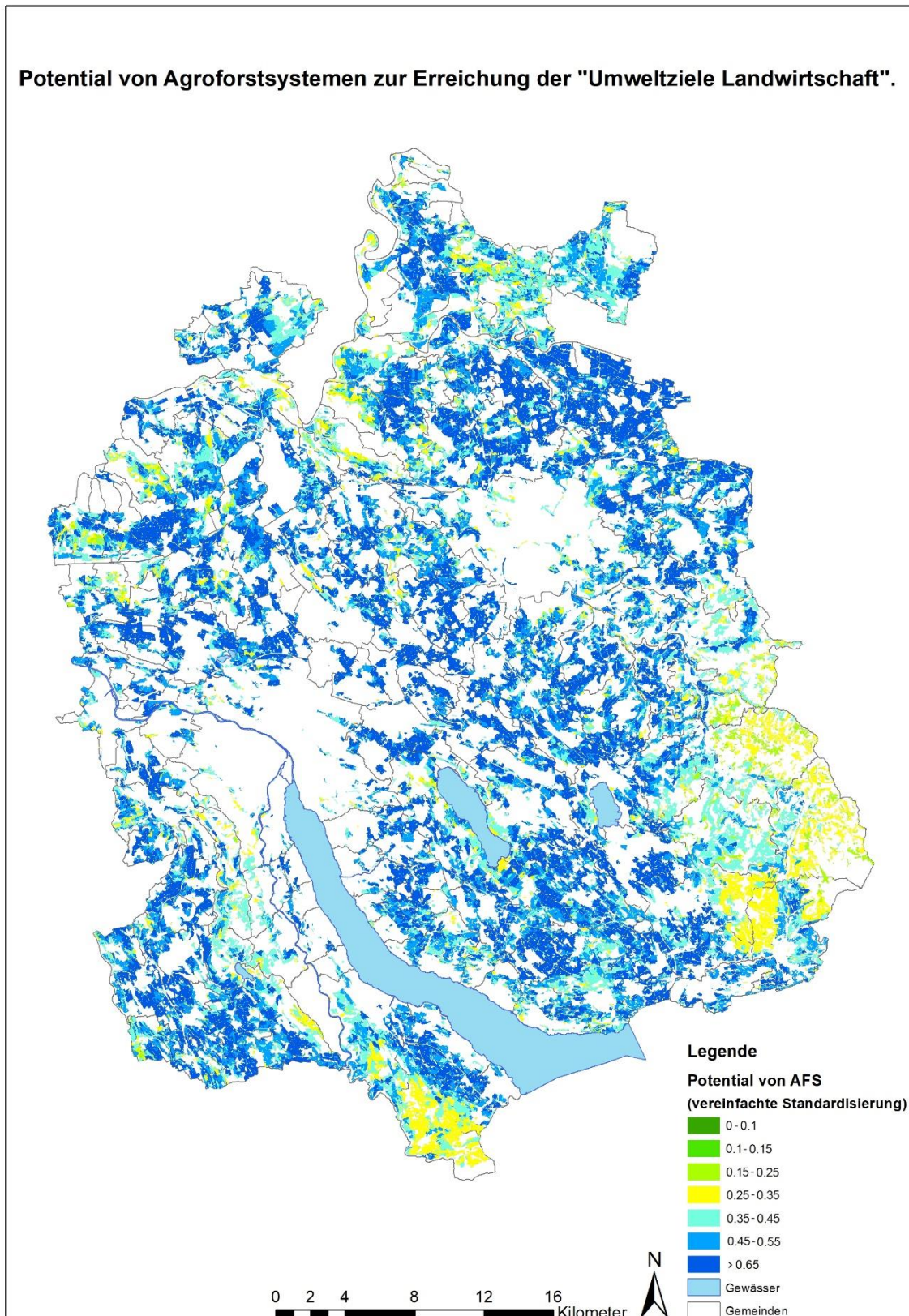


Abbildung 17: Potential der Parzellen ohne Utilityfunctions. Eine vereinfachte Standardisierung wurde durchgeführt, um die Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

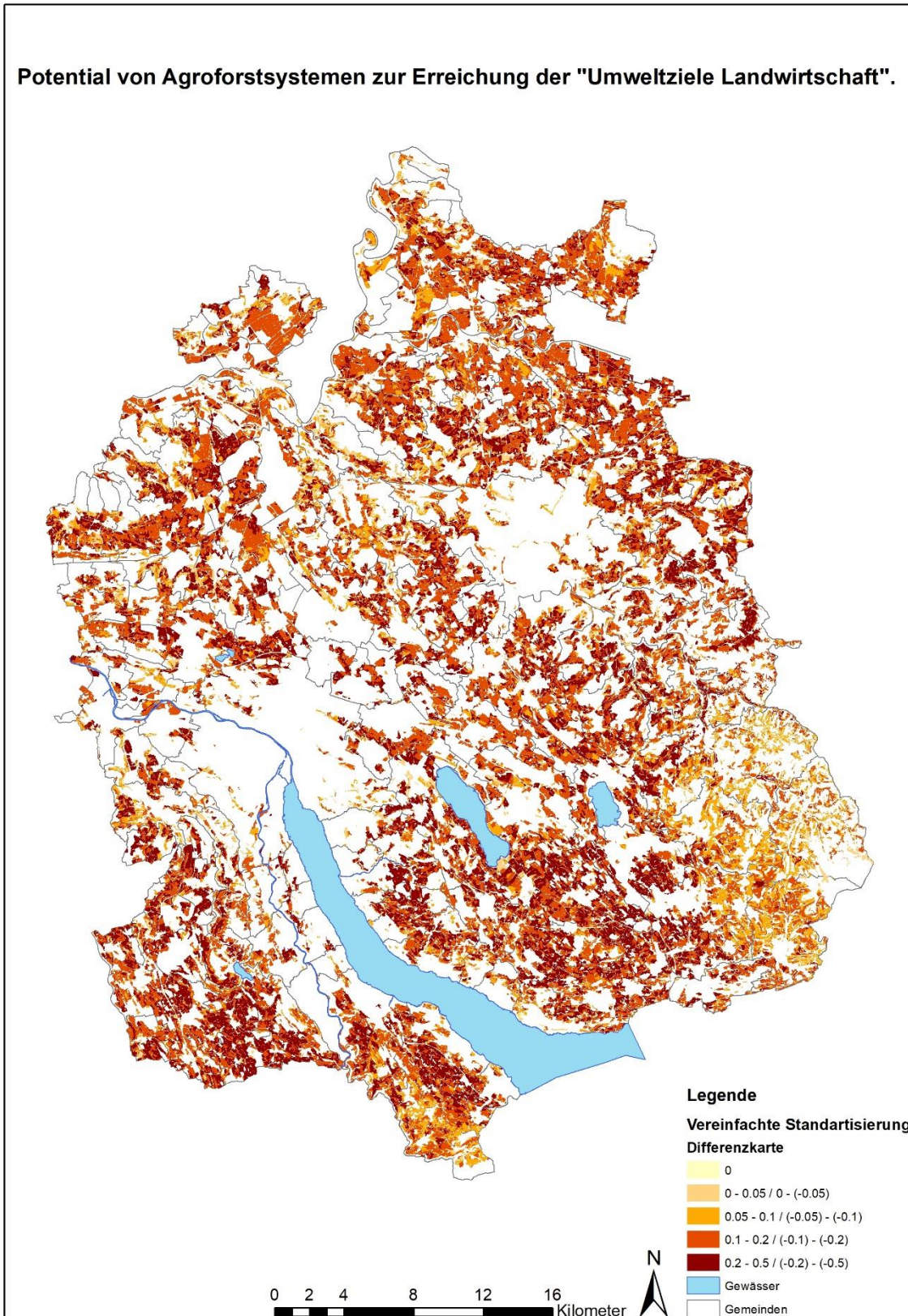


Abbildung 18: Differenzkarte zu dem Potential mit und ohne Utilityfunctions.

### 3.5.4. Sensitivität zum Ausschluss eines stark korrelierenden Kriteriums

Bei der Berechnung der Korrelationen konnte festgestellt werden, dass die Kriterien Feinstaub Immission (PM10) und Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>) stark korrelieren. Sie weisen einen Korrelationskoeffizient von 0.64 auf (Tabelle 8), welcher nach Cohen (1992) als stark korrelierend einzuteilen ist. Für die Sensitivitätsanalyse zum Ausschluss eines stark korrelierenden Kriteriums wurde ein Vergleich zwischen dem Resultat mit und ohne Einbezug des Kriteriums Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>) angestellt. Dieses Kriterium wurde gewählt, da von einigen Experten bezweifelt wurde, ob Agroforstsysteme einen Einfluss auf die Stickoxid Immission haben können. Somit konnten in die Sensitivitätsanalyse das stark korrelierende Kriterium und die Expertenmeinung zum Kriterium mit einbezogen werden.

In Abbildung 19 wird die Karte zum Ausschluss des Kriteriums Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>) dargestellt. Es kann eine allgemeine Verringerung des Potentials verglichen mit der Potentialkarte von Abbildung 8 aufgezeigt werden. Die Differenzkarte in Abbildung 20 und der Boxplot in Abbildung 21 relativieren den Einfluss des Kriteriums jedoch. Die Sensitivität zum Ausschluss des Kriteriums Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>) weist den geringsten Einfluss auf das Potential auf.

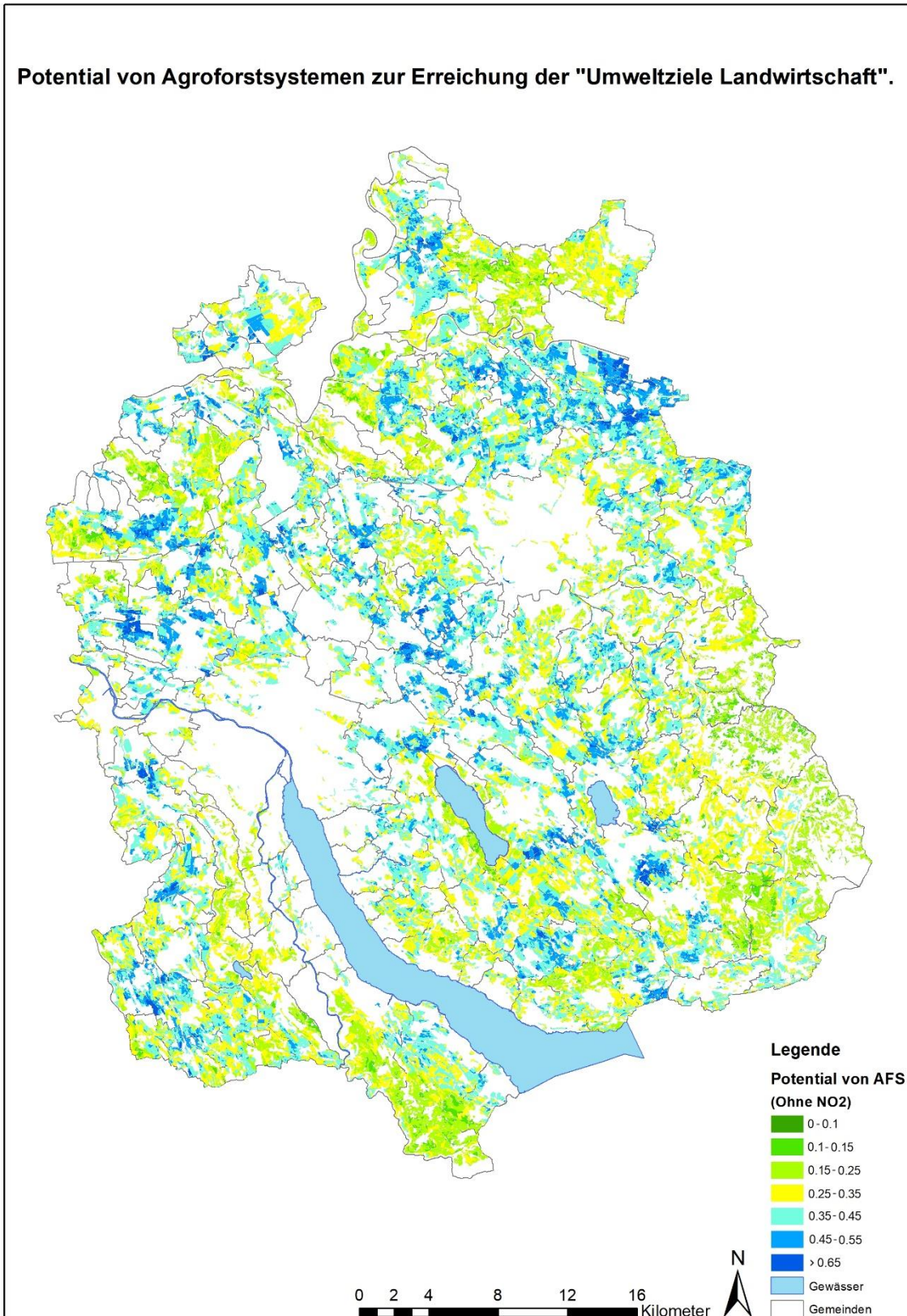


Abbildung 19: Potential der Parzellen im Kanton Zürich ohne das Kriterium Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>).



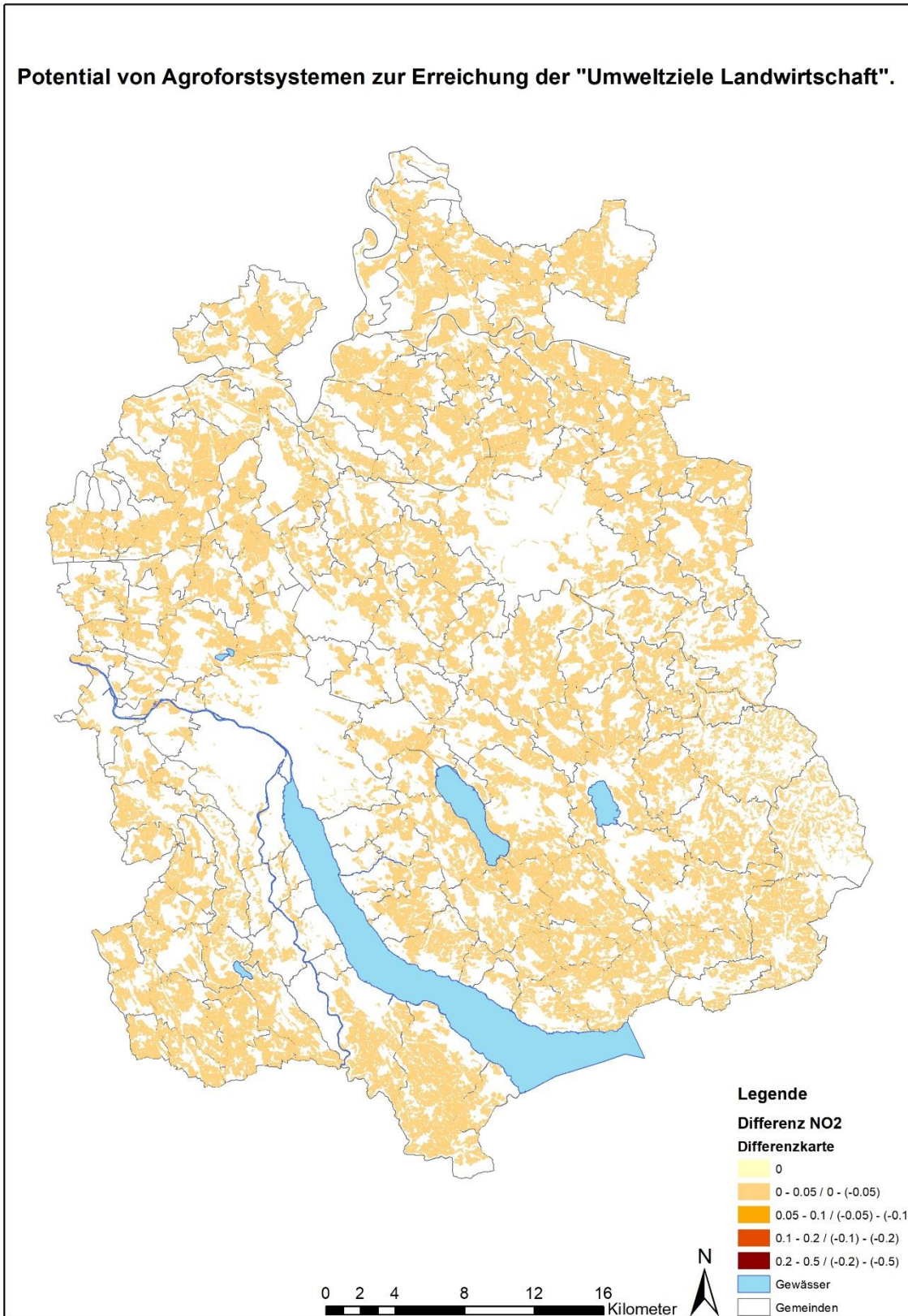


Abbildung 20: Differenzkarte zu dem Einbezug und Ausschluss des stark korrelierenden Kriteriums Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>).

### 3.5.5. Vergleich der Sensitivitätsanalysen

Der angestellte Vergleich der Sensitivitätsanalysen zeigt, dass die Utilityfunctions am sensitivsten auf Veränderungen reagieren (Abbildung 21). Aufgrund dieser Sensitivität der Utilityfunctions wurde eine weitere Sensitivitätsanalyse angestellt, bei welcher die Utilityfunktion des am stärksten gewichteten Kriteriums, die Bodeneigenschaften, verändert wurde.

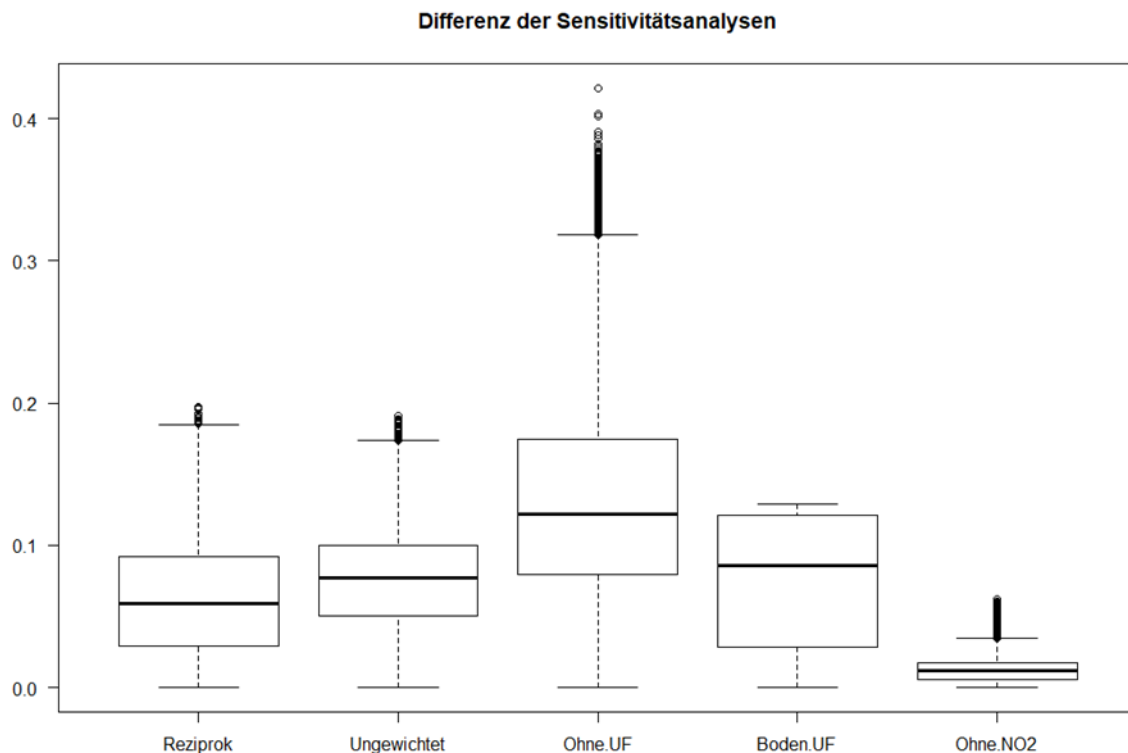


Abbildung 21: Die Abbildung zeigt die Verteilung der Differenz der Sensitivitätsanalysen zur Potentialkarte an. Die Sensitivität der Utilityfunctions (UF) hat den grössten Einfluss auf die Resultate.

### 3.5.6. Sensitivität zur Utilityfunktion der Bodeneigenschaften

Die Karte zum Potential von Agroforstsystemen mit veränderter Utilityfunktion der Bodeneigenschaften wird in Abbildung 22 dargestellt. Bei der Gegenüberstellung der Resultate mit und ohne veränderter Utilityfunktion der Bodeneigenschaften wird ersichtlich, dass der ackerbaubetonte Norden des Kantons Zürich durch die Veränderung der Utilityfunktion ein grösseres Potential aufweist. Auf die Flächen im Süden des Kantons Zürich verringert sich das Potential. Die Differenzkarte zeigt, dass sich der Einfluss der Veränderung vor allem auf den Norden des Kantons Zürich auswirkt (Abbildung 23).

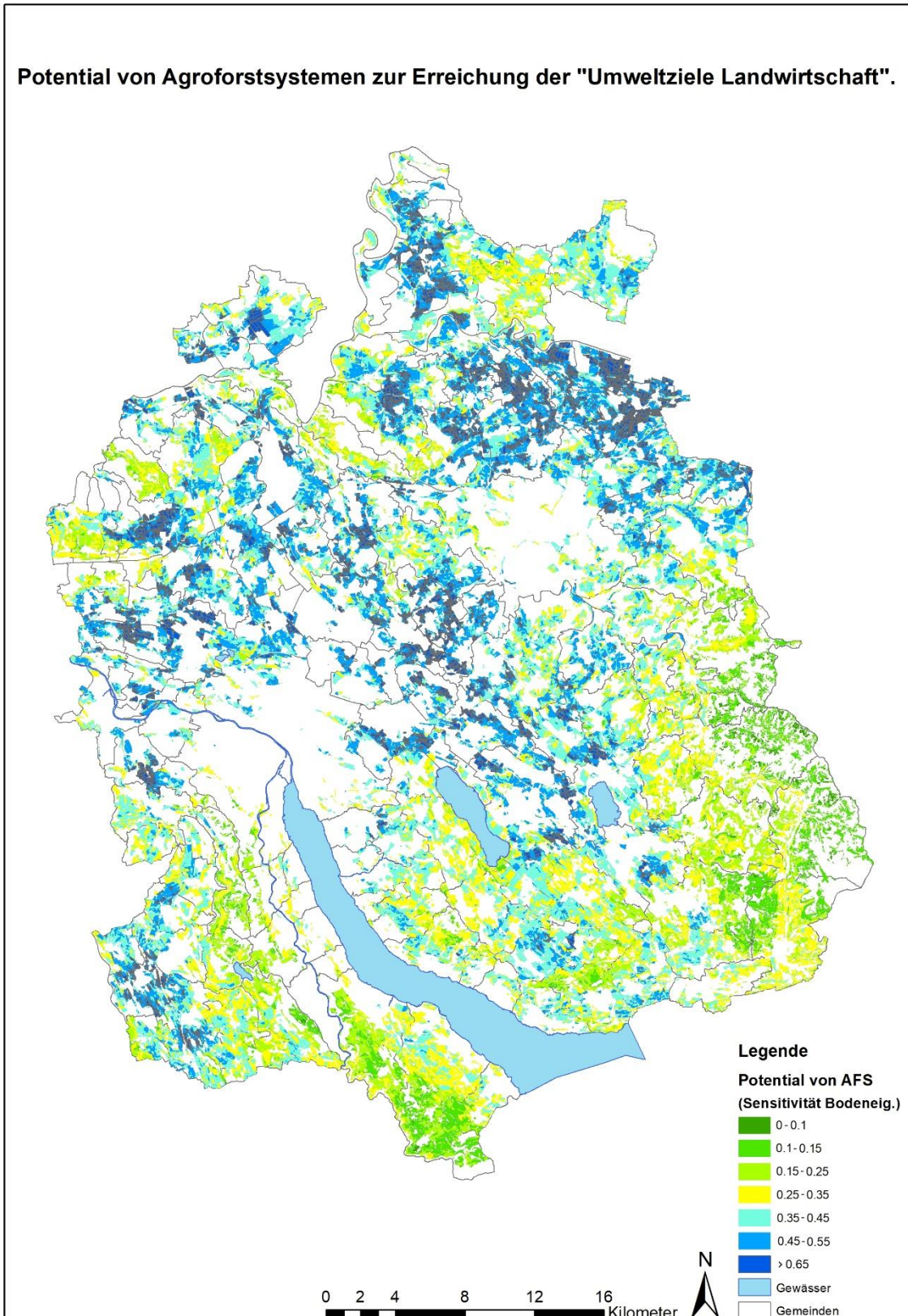


Abbildung 22: Potential der Parzellen im Kanton Zürich mit veränderter Utilityfunction zu den Bodeneigenschaften.

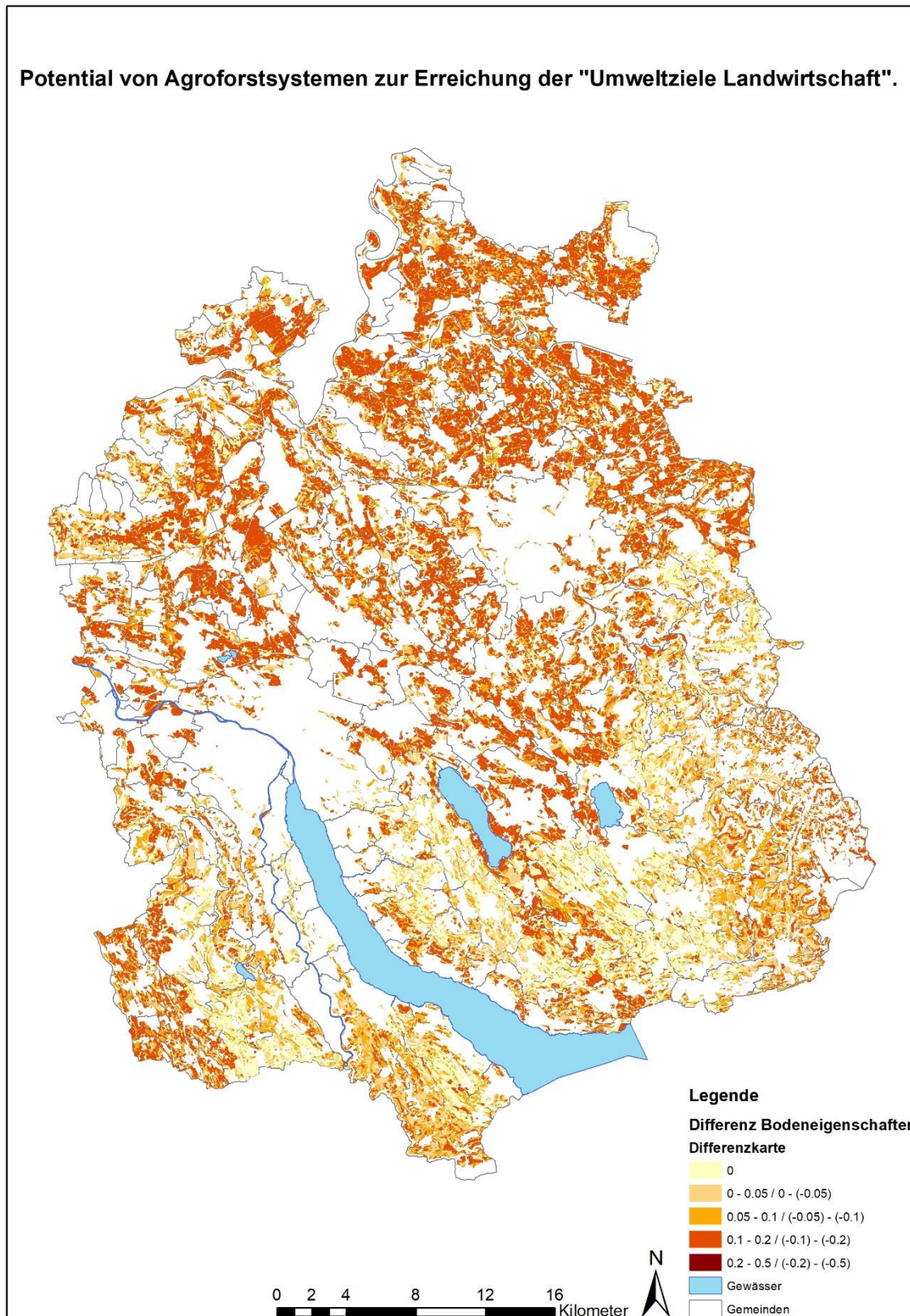


Abbildung 23: Differenzkarte zum Potential mit und ohne veränderter Utilityfunction zu den Bodeneigenschaften.

## 4. Diskussion

### 4.1. Forschungsfrage

Die Literaturrecherche zu den Ökosystemleistungen von Agroforstsystemen zeigt, dass AFS einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der „Umweltziele Landwirtschaft“ leisten können. Die Quantifizierung dieses Beitrags wird durch die Überlagerung der gewichteten Kriterien ermöglicht. Die landwirtschaftlichen Nutzflächen mit grossem Potential sind über den ganzen Kanton Zürich verteilt. In Abbildung 10 werden die Parzellen aufgezeigt, welche mehr als neun Überlagerungen haben. Diese häufen sich im Norden des Kantons Zürich.

### 4.2. Eignung von Agroforstsystemen

Um die Eignung von Agroforstsystemen (AFS) auf landwirtschaftlichen Nutzflächen zu prüfen, müssen die Vor- und Nachteile abgewogen werden. Die Vorteile ergeben sich aus den Ökosystemleistungen und der erhöhten Biodiversität (3.1.3. Ökosystemleistungen von Agroforstsystemen). Im Folgenden werden einige Nachteile von AFS genannt:

- AFS benötigen Grundkenntnisse zur Bewirtschaftung von Bäumen oder zumindest Interesse an der Arbeit mit Bäumen von Seiten der Bewirtschafter\*Innen, um von der Kombination der land- und forstwirtschaftlichen Praktiken zu profitieren (Kay et al. 2019b).
- Die Gehölzpflanzen der AFS können zur Konkurrenz um natürliche Ressourcen für die Landwirtschaft werden, beispielsweise wenn eine Beschattung im Umkreis der Bäume auf die Kulturen erfolgt (Hofmann et al. 2017).
- AFS erhöhen den Arbeitsaufwand auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche (Chalmin 2009).
- AFS benötigen eine lange Etablierungsphase (Sereke 2012).
- AFS können Mäuse fördern, wodurch Schäden entstehen können (Veste & Böhm 2018).

Diese Nachteile können durch ein standortangepasstes System jedoch minimiert werden. Die Konkurrenz kann beispielsweise durch Vermeidung von flachwurzelnenden Bäumen und durch eine Besetzung von zeitlich oder räumlichen Nischen vermindert werden (Chalmin 2009). Der erhöhte Arbeitsaufwand kann zum Teil durch Direktzahlungen, den zusätzlichen Ertrag von Früchten oder Holz und die gesteigerte und sicherere Ernte sowie durch ein breiteres Produktionsfeld kompensiert werden (Kaeser et al. 2011). Die Eignung von AFS auf landwirtschaftlicher Nutzfläche ist somit generell gegeben.

### 4.3. Gewichtung und Ranking

Zur Gewichtung der Kriterien wurde die Ranking-Methode gewählt. Diese ermöglicht trotz der grossen Anzahl zu vergleichender Kriterien eine einfache Ausführung der Gewichtung. Da die Ranking-Methode durch Experten durchgeführt wurde, galt die einfache Handhabung als primäres

Ziel, um die Experten nicht zu lange zu beanspruchen und möglichst viele Experten konsultieren zu können.

Für die Verarbeitung der Resultate aus den Experteninterviews wurde das summierte Ranking verwendet. Dieses verteilt das Gewicht der Kriterien so, dass die Differenz zwischen dem Gewicht zweier Kriterien immer gleich ist. In der Sensitivitätsanalyse des Rankings wird das reziproke Ranking beschrieben. Dieses teilt im Unterschied zum summierten Ranking den ranghöchsten Kriterien mehr Wert zu. In Tabelle 7 ist ersichtlich, dass die Experten das Kriterium Bodeneigenschaften am häufigsten mit einem hohen Rang bewertet haben. Auch die Biodiversität wurde von den Experten als besonders wichtig eingestuft. Das reziproke Ranking kann im Gegensatz zum summierten Ranking diesen Präferenzen der Experten Rechnung tragen.

#### 4.4. Utilityfunction der Kriterien

Die Utilityfunctions sind massgebend für den Vergleich der Kriterien. Durch die Richt- und Grenzwerte kann für einige Kriterien ein Wert definiert werden, ab dem ein Defizit besteht oder eine Verbesserung stattfindet. Die Funktionen, welche die Skalierung der Werte bis zur Erreichung und nach Überschreitung des Richtwerts beschreiben, sind jedoch stark vereinfacht. Für die Kriterien mit metrisch skalierten Werten wurde angenommen, dass die Werte, die den Richtwert überschreiten (bzw. unterschreiten bei der Wasserverfügbarkeit für Pflanzen), linear verteilt sind. Diese Annahme könnte durch das Konsultieren von Experten angepasst werden, um sie den realen Bedingungen und den Auswirkungen der Umweltdefizite oder Umweltverbesserungen weiter anzunähern.

Für einige der Kriterien wurden Ansätze entwickelt, um räumliche Daten durch Veränderung oder Kombinationen von vorhandenen Daten zu erstellen. Zu den Kriterien der Biodiversität, der Ästhetik, dem Deckungsgrad der Biene und dem Zugang der Parzelle zur Erholung konnten Anhaltspunkte aus der Literatur gesammelt werden, um die Ansätze zu stützen. Für das Kriterium der Ästhetik wurden Anhaltspunkte aus der Literatur verwendet und eine Validierung mit einer Expertin durchgeführt.

Zum Kriterium der Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft wurde ein eigener Ansatz entwickelt, weil dazu keine Daten verfügbar sind und keine Anhaltspunkte im Rahmen der Literaturrecherche ausfindig gemacht werden konnten. Für die Wahl der Gemeinden mit Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft wurden folgende Gedankengänge angestellt:

- Die Gemeinden, welche einen hohen Anteil an Wählern von ökologisch und sozial ausgerichteten Parteien haben, setzen sich für nachhaltige, umweltfreundliche und partizipative Projekte ein. Dadurch wird die Bereitschaft zur Teilhabe der Bevölkerung/Gemeinde an der Landwirtschaft gesteigert.
- Die Gemeinden mit einem überdurchschnittlichen steuerbaren Einkommen von natürlichen Personen, weisen höhere Bereitschaft auf einen Aufpreis für lokale und ökologische Produkte zu zahlen. Sie haben ebenfalls Interesse daran, zu erfahren, wo und wie ihre Lebensmittel produziert werden und dabei mitzuwirken. In Gemeinden mit einem steuerbaren Einkommen natürlicher Personen über dem 75% Quantil wird die Bereitschaft zur

Teilhabe als geringer angenommen, da vermutet wird, dass kein Interesse an zusätzlicher Arbeit neben dem Beruf besteht.

- Die dritte Eigenschaft der Gemeinde beschreibt den Bildungsstand. Es wird angenommen, dass Gemeinden mit einem über dem Durchschnitt liegenden Bildungsstand (Prozentanteil Schülern der Tertiärstufe) Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft aufweisen, da ein erhöhtes Interesse an ökologischer und nachhaltiger Produktion besteht.

Diese Annahmen könnten durch Umfragen in solidarischen Landwirtschaften, welche die Teilhabe an der Landwirtschaft schon heute ermöglichen, ergänzt werden.

#### **4.5. Potential von Agroforstsystemen zur Erreichung der „Umweltziele Landwirtschaft“**

Die Analyse zum Potential von Agroforstsystemen (AFS) zur Erreichung der „Umweltziele Landwirtschaft“ (UZL) ist auf die 13 ausgewählten Kriterien beschränkt, berücksichtigt aber wichtige Faktoren der Landwirtschaft. Durch die entwickelten Ansätze konnten auch über die Datenverfügbarkeit hinaus Aussagen zum Potential von AFS zur Erreichung der UZL getroffen werden. Gleichzeitig konnte auch Bezug auf eine grosse Anzahl nicht erreichter Teilziele der UZL genommen werden. Die Liste an verwendeten Kriterien ist nicht abschliessend. Nicht berücksichtigt wurden beispielsweise die Defizite zum Gewässerraum, der Erosion, der Ammoniakkonzentration, des Temperaturanstiegs oder der Niederschlagsveränderung, welche von Kay et al. (2019b) einbezogen werden.

#### **4.6. Vergleich mit den Resultaten von Kay et al. (2019b)**

Die Publikation von Kay et al. (2019b) trifft Aussagen zu den schweizweiten Defiziten. Die Datengrundlage zu einigen relevanten Faktoren der Landwirtschaft, wie den Bodeneigenschaften oder der Biodiversität, ist jedoch für die Schweiz nicht flächendeckend verfügbar. Die nicht berücksichtigten Faktoren bilden eine Limitierung in der Publikation von Kay et al. (2019b), welche in der Masterarbeit aufgegriffen wurde.

Kay et al. (2019b) beschreiben die Auflösung der Resultate als weitere Limitierung, da kleinräumigen Veränderungen dadurch nicht Rechnung getragen werden kann. Auch diese Limitierung wurde aufgegriffen, weshalb die Resultate der Masterarbeit auf Parzellenebene generiert wurden. Die Auflösung auf Parzellenebene bringt den Vorteil, dass kleinräumigere Strukturen mehr Geltung bekommen. Des Weiteren können die Potentialflächen dadurch einfach identifiziert werden. Erwähnt werden muss hierbei, dass die Raster-Layer eine Auflösung von 100 m x 100 m (oder grösser) haben und somit der Genauigkeit auf Parzellenebene nicht gänzlich genügen. Es handelt sich bei den verwendeten Daten jedoch um die besten zur Verfügung stehenden.

#### **4.7. Validität**

In Abbildung 24 werden die Resultate zur Anzahl der Umweltdefizite (UD) und Umweltverbesserungen (UV) den Resultaten zu den UD der Publikation von Kay et al. (2019b) gegenübergestellt.

Es kann aufgezeigt werden, dass die Parzellen mit vielen UD und UV in denselben Gebieten auftreten (in Abbildung 24 rot eingefasst) und dies, obwohl nicht alle UD und UV vergleichbar mit den Defiziten der Publikation aus Kay et al. (2019b) sind (Tabelle 16 im Anhang). Dies deutet darauf hin, dass in diesen Gebieten allgemein ein grosses Potential zur Erreichung der „Umweltziele Landwirtschaft“ (UZL) liegt, unabhängig davon, welche Defizite oder Kriterien betrachtet werden. Agroforstsysteme bieten die Möglichkeit, gerade bei einer Vielzahl an auftretenden UD und UV eine Verbesserung der Bedingungen hervorzurufen und einen bedeutenden Beitrag zur Erreichung der UZL zu leisten.

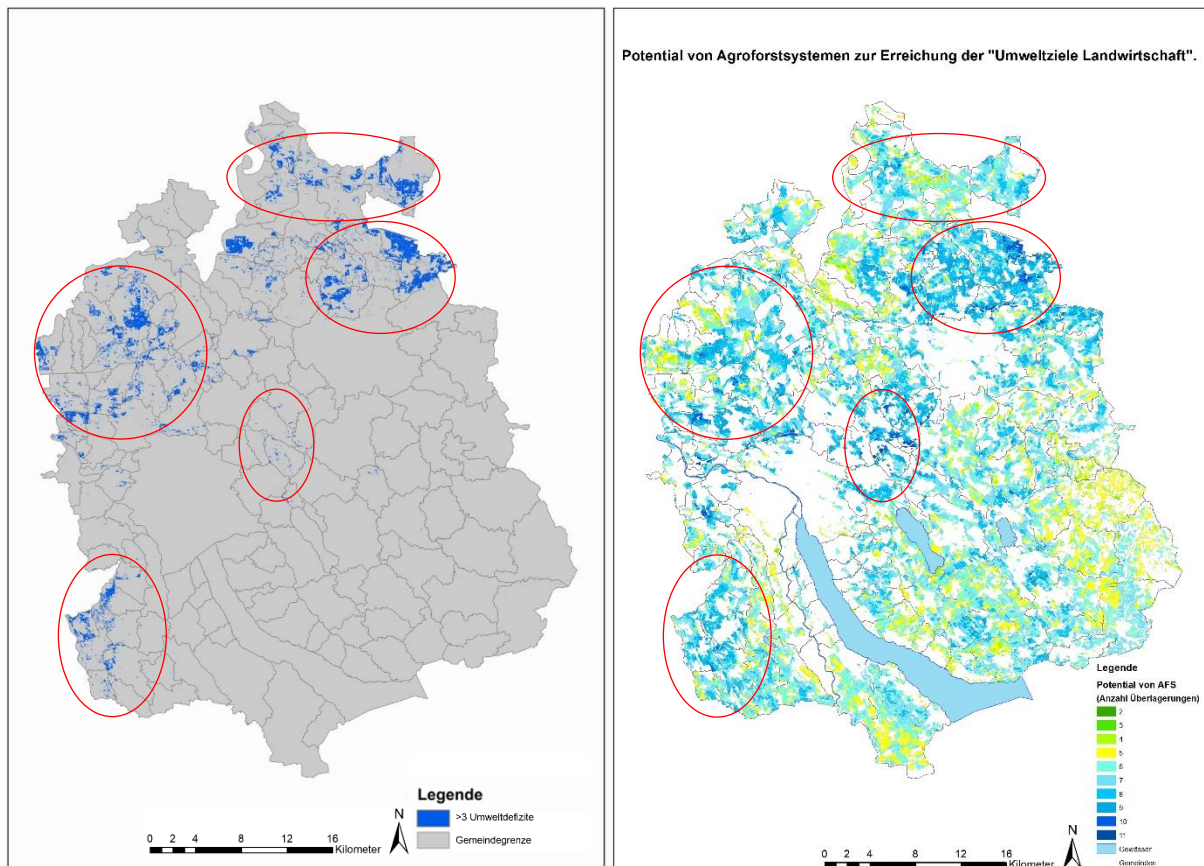


Abbildung 24: Gegenüberstellung der Resultate von Kay et al. (2019b) zu den überlagernden Defiziten und der Potentiakarte zu den überlagernden Umweltdefiziten und Umweltverbesserungen der Masterarbeit.

#### 4.8. Wie werden die Potentialflächen bewirtschaftet?

Die Bewirtschaftung der 1000 Parzellen mit dem grössten Potential wurde analysiert. Dabei wird ersichtlich, dass die landwirtschaftlichen Nutzflächen mit dem grössten Potential eine eingeschränkte Nutzungseignung aufweisen. Es handelt sich vor allem um futterbaubetonte Flächen, Wiesen und Weiden (Tabelle 10 im Anhang). Auch bei der Analyse der 6894 Parzellen mit dem grössten Potential kann aufgezeigt werden, dass es sich vor allem futterbaubetonte Flächen, Wiesen und Weiden handelt (Tabelle 12 im Anhang).



Des Weiteren wurden alle Parzellen mit neun oder mehr überlagernden Umweltdefiziten und Umweltverbesserungen analysiert. Neun oder mehr Überlagerungen konnten auf 6894 Parzellen ausgemacht werden. Diese weisen mehrheitlich Nutzungseignungen mit guten Bodeneigenschaften und geringen Limitierungen auf. Die Nutzungseignungen „Uneingeschränkte Fruchtfolge 1. Güte“ und „Uneingeschränkte Fruchtfolge 2. Güte“ sowie „Getreidebetonte Fruchtfolge 1. Güte“ und „Getreidebetonte Fruchtfolge 2. Güte“ sind jeweils mit insgesamt rund 35% vertreten (Tabelle 14).

Hervorzuheben ist, dass die Parzellen mit den meisten Überlagerungen nicht deckungsgleich sind mit den Parzellen, welche das grösste Potential aufweisen. Das Gewicht der Kriterien verursacht diese Diskrepanz. Bei der Karte zu der Anzahl Überlagerung wird nur gezählt wie viele Kriterien überlagern und nicht wie stark. So kann eine Parzelle viele Überlagerungen aufweisen und nur ein schwach ausgeprägtes Potential zur Milderung von UD und zur Steigerung der UV. Eine Parzelle mit weniger überlagernden UD und UV, aber höheren Werten zu stark gewichteten Kriterien wird bei der Analyse nach dem grössten Potential hervorgehoben.

Deshalb ist es sinnvoll beide Karten (Abbildung 8 und 9) zu betrachten, um die Parzellen auszuwählen, auf welcher AFS die grösste Wirkung erzielen. Bei einer grossen Anzahl an Überlagerungen kommen die Vorteile der Multifunktionalität von AFS gegenüber anderen Bewirtschaftungsformen besonders stark zur Geltung.

## 4.9. Sensitivitätsanalyse

Durch die Sensitivitätsanalysen konnte aufgezeigt werden, wie gross der Einfluss der entwickelten Ansätze und der verwendeten Methodik ist. Deshalb wurden die Analysen an Schlüsselpunkten der Methodik angesetzt. Diese sind die Rankingmethode, die Gewichtung der Kriterien sowie die Utilityfunctions. Des Weiteren wurden die Kriterien auf Korrelationen überprüft. Diese Analyse hat jedoch ergeben, dass der Einfluss des korrelierenden Kriteriums Stickoxid Immission (NO<sub>2</sub>) als gering eingeschätzt wird.

Die Sensitivität der Utilityfunctions weist den grössten Einfluss auf die Resultate auf (Abbildung 21). Die Veränderungen der Potentialwerte treten im ganzen Kanton Zürich in hohem Masse auf, verglichen zu den anderen Sensitivitätsanalysen. Die Sensitivität der Utilityfunctions zeigt somit eine Limitierung der Masterarbeit auf. Durch die Konsultierung von Experten zu den Utilityfunctions könnte die Limitierung der Arbeit aufgegriffen werden, um die Annahmen der Utilityfunctions zu validieren.

## 4.10. Trade off

Nicht auf jeder landwirtschaftlichen Nutzfläche führt auch jedes Agroforstsystem (AFS) zu einer Verbesserung der Bedingungen. Wenn das AFS jedoch die Standortbedingungen, die Ansprüche der Bewirtschafter\*Innen und der Ökosysteme berücksichtigt und daran angepasst wird, kann davon ausgegangen werden, dass AFS durch die Strukturvielfalt, die Förderung der Biodiversität und die Bereitstellung der Ökosystemleistungen eine Verbesserung der Bedingungen hervorrufen.

## 5. Ausblick

Das Ziel dieser Masterarbeit lag darin, eine Karte zu erstellen, welche das Potential von Agroforstsystemen zur Verbesserung der "Umweltziele Landwirtschaft" (UZL) im Kanton Zürich aufzeigt. Mit den erstellten Karten kann das Potential von Agroforstsystemen zu den gewählten Kriterien dargestellt werden. Die Kriterien decken dabei einen grossen Teil der in den UZL erwähnten Themenbereiche der Landwirtschaft ab. Die Karten können dem Kanton Zürich somit als Werkzeug dienen, um auf die Gemeinden oder Bewirtschafter\*Innen von Parzellen mit hohem Potential zuzugehen und ihnen auch eine mögliche Lösung, nämlich Agroforstsysteme, zur Erreichung der UZL zu präsentieren.

### 5.1. Weiterführung der Masterarbeit

Die Limitierungen der Masterarbeit betreffend der Utilityfunctions, der Ansätze zu den Kriterien der Biodiversität, Ästhetik, Zugang der Parzelle zur Erholung, Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft können in weiterführenden Arbeiten mit Experten validiert werden.

Ein weiterer Schritt könnte die Erarbeitung von konkreten Agroforstsystemen auf den Potentialflächen sein, wodurch Empfehlungen zu konkreten Massnahmen an die Gemeinden oder Bewirtschafter\*Innen vermittelt werden können.

Die Methodik zu den Kriterien und das R-Skript können auch auf andere Kantone angewendet werden. Das R-Skript ermöglicht eine einfache Anpassung der Kriterien, um den neuen kantonalen Gegebenheiten gerecht zu werden. Auch können zusätzliche Kriterien einfach hinzugefügt werden.

### 5.2. Begrenzung auf landwirtschaftliche Nutzflächen

Um die Möglichkeiten von AFS vollumfänglich zu beschreiben, könnten auch Flächen analysiert werden, welche nicht als landwirtschaftliche Nutzfläche (Bundesrat 1998) klassifiziert sind. Dabei könnten beispielsweise öffentliche Grünflächen, Parks, Waldflächen, Wytweiden und Selven sowie Gebäude in der Stadt mit Aufstockungspotential (Trutmann & Sudau 2019) mit einbezogen werden.

### 5.3. Nächste Schritte

Für eine der Parzellen mit hohem Potential könnte mit einer engagierten Gemeinde oder einem\*einer interessierten Bewirtschafter\*In erste Schritte und Massnahmen ausgearbeitet werden. Dazu würde die Beurteilung des Standortes, die Absprache mit den Ansprüchen des\*der Bewirtschafters\*In und die Beurteilung der vorhandenen Ökosysteme gehören. Daraus können schliesslich Kombinationen von Pflanzen und das konkrete Agroforstsystem für diesen Standort gewählt werden.

## 6. Literatur

Amt für Landschaft und Natur Zürich (Hg.) (2014). Landwirtschaft und Landschaft im Kanton Zürich. Handlungsbedarf für die kantonale Politik.

Anderson, S. H., Udawatta, R. P., Seobi, T., & Garrett, H. E. (2009). Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry systems*, 75(1), 5-16.

BAFU & BLW (2016). Umweltziele Landwirtschaft – Statusbericht 2016. Umwelt-Wissen 144. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

BAFU (2017). Bundesamt für Umwelt. Luftqualität 2017. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Bern: Bundesamt für Umwelt. 2018.

Beckett, K. P., Freer-Smith, P. H., & Taylor, G. (2000). Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global change biology*, 6(8), 995-1003.

Björklund, J., Eksvärd, K., & Schaffer, C. (2019). Exploring the potential of edible forest gardens: experiences from a participatory action research project in Sweden. *Agroforestry Systems*, 93(3), 1107-1118.

BLW (2018). Vernehmlassung zur Agrarpolitik ab 2022 (AP22+), Erläuternder Bericht. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.

Brack, C. L. (2002). Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. *Environmental pollution*, 116, S195-S200.

Buchecker, M. (1999). Die Landschaft als Lebensraum der Bewohner-nachhaltige Landschaftsentwicklung durch Bedürfniserfüllung, Partizipation und Identifikation: theoretische Begründung, empirische Untersuchung und Evaluation von Methoden zur praktischen Umsetzung (Doctoral dissertation, Verlag nicht ermittelbar).

Bundesrat (1998). Verordnung über landwirtschaftliche Begriffe und die Anerkennung von Betriebsformen (Landwirtschaftliche Begriffsverordnung LBV) vom 7. Dezember 1998, SR 910.91, (Abgerufen am 10.09.2019)

Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Beral, C., Barthès, B. G., Dupraz, C., ... & Chenu, C. (2017). Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: a survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 243-255.

Chalmin, A. (2009). Produktionsaspekte in Agroforstsystemen mit Werthölzern–landwirtschaftliche Produktion. In *Anbau und Nutzung von Bäumen auf Landwirtschaftlichen Flächen*.

Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological bulletin*, 112(1), 155.

Collins, M. G., Steiner, F. R., & Rushman, M. J. (2001). Land-use suitability analysis in the United States: historical development and promising technological achievements. *Environmental management*, 28(5), 611-621.

- Dupraz, C., Newman, S. M., & Gordon, A. M. (1997). Temperate agroforestry: the European way. *Temperate agroforestry systems*, 181-236.
- Eichhorn, M. P., Paris, P., Herzog, F., Incoll, L. D., Liagre, F., Mantzanas, K., ... & Pisanelli, A. (2006). Silvoarable systems in Europe—past, present and future prospects. *Agroforestry systems*, 67(1), 29-50.
- Fagerholm, N., Torralba, M., Burgess, P. J., & Plieninger, T. (2016). A systematic map of ecosystem services assessments around European agroforestry. *Ecological Indicators*, 62, 47-65.
- Feick, R., & Hall, B. (2004). A method for examining the spatial dimension of multi-criteria weight sensitivity. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8), 815-840.
- García de Jalón, S., Burgess, P. J., Graves, A., Moreno, G., McAdam, J., Pottier, E., ... & Palma, J. H. (2018). How is agroforestry perceived in Europe? An assessment of positive and negative aspects by stakeholders. *Agroforestry Systems*, 92(4), 829-848.
- Graves, A. R., Burgess, P. J., Liagre, F., Pisanelli, A., Paris, P., Moreno, G., ... & Mantzanas, K. (2009). Farmer perceptions of silvoarable systems in seven European countries. In *Agroforestry in Europe* (pp. 67-86). Springer, Dordrecht.
- Grêt-Regamey, A., Altwegg, J., Sirén, E. A., Van Strien, M. J., & Weibel, B. (2017). Integrating ecosystem services into spatial planning—A spatial decision support tool. *Landscape and Urban Planning*, 165, 206-219.
- Grêt-Regamey, A. & Van Strien, M. J. (2019). Skript zur Vorlesung Multi-Criteria Decision Analysis Information an der ETH Zürich.
- Grün Stadt Zürich (2016). Bedeutung und Entwicklung der Landwirtschaft in der Stadt Zürich. ([https://www.stadt-zuerich.ch/epaper/TED/GSZ/Stadtlandwirtschaft\\_output/web/flipviewerxpress.html](https://www.stadt-zuerich.ch/epaper/TED/GSZ/Stadtlandwirtschaft_output/web/flipviewerxpress.html), Abgerufen am 01.10.19)
- Grünwald, H. & Reeg, T. (2009). Überblick über den Stand der Forschung zu Agroforstsystemen in Deutschland. *Anbau und Nutzung von Bäumen auf Landwirtschaftlichen Flächen*, 231-239.
- Herzog, F. (1998). Streuobst: a traditional agroforestry system as a model for agroforestry development in temperate Europe. *Agroforestry systems*, 42(1), 61-80.
- Herzog, F. (2000). The importance of perennial trees for the balance of northern European agricultural landscapes. *Unasylva*, 200(51), 42-48.
- Herzog, F. (2011). Umweltleistungen von Bäumen in der offenen Agrarlandschaft. *Ökologie & Landbau*, 4, 54-56.
- Hofmann, P., Hübner-Rosenau, D., Bloch, R., & Cremer, T. (2017). Konzeption eines Agroforst-Modellvorhabens für das Löwenberger Land (Brandenburg). *Bäume in der Land (wirt) schaft—von der Theorie in die Praxis*, 99.

Jaffré, T., Pillon, Y., Thomine, S., & Merlot, S. (2013). The metal hyperaccumulators from New Caledonia can broaden our understanding of nickel accumulation in plants. *Frontiers in plant science*, 4, 279.

Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry systems*, 76(1), 1-10.

Kaesler, A., Palma, J., Sereke, F., & Herzog, F. (2010a). Umweltleistungen von Agroforstwirtschaft. Die Bedeutung von Bäumen in der Landwirtschaft für Gewässer- und Bodenschutz, Klima, Biodiversität und Landschaftsbild. *ART-Bericht*, 736, 1-12.

Kaesler, A., Sereke, F., Dux, D., & Herzog, F. (2010b). Modern agroforestry in Switzerland: Innovative orchards: Productivity and efficiency. *ART-Berichte, Switzerland*, (725), 1-12.

Kaesler, A., Sereke, F., Dux, D., & Herzog, F. (2011). Agroforstwirtschaft in der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz*, 2(3), 128-133.

Kaim, A., Cord, A. F., & Volk, M. (2018). A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation. *Environmental Modelling & Software*, 105, 79-93.

Kay, S., Crous-Duran, J., Ferreira-Domínguez, N., García de Jalón, S., Graves, A., Moreno, G., ... & Szerencsits, E. (2018). Spatial similarities between European agroforestry systems and ecosystem services at the landscape scale. *Agroforestry Systems*, 92(4), 1075-1089.

Kay S., Rega, C., Moreno, G., den Herder, M., Palma, J. H., Borek, R., ... & Jäger, M. (2019a). Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe.

Kay S., Jäger M., Herzog F. (2019b). Ressourcenschutz durch Agroforstsysteme – standortangepasste Lösungen. *Agrarforschung Schweiz* 10(9), 308–315.

Kazemi, H., & Akinci, H. (2018). A land use suitability model for rainfed farming by Multi-criteria Decision-making Analysis (MCDA) and Geographic Information System (GIS). *Ecological engineering*, 116, 1-6.

Klein, T. M., Hayek, U. W., Celio, E., & Grêt-Regamey, A. (2013). Decision Support Systems and Tools as Collaborative Web Platform for Sustainable Development of Landscapes. *Proceedings REAL CORP*, 239-247.

Kritikos, T. R., & Davies, T. R. (2011). GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis for landslide susceptibility mapping at northern Evia, Greece [GIS-basierte multikriterielle Entscheidungsanalysen zur Kartierung von Massenverlagerungspotenzialen im nördlichen Evia, Griechenland.]. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 162(4), 421-434.

Larsen, L. C., Zambrano, K. C., Christiansen, H., Köhler, A., Karlson, U., & Trapp, S. (2001). Bepflanzung einer Tankstelle mit Weiden. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 13(4), 227-236.

- Lindemann-Matthies, P., Briegel, R., Schüpbach, B., & Junge, X. (2010). Aesthetic preference for a Swiss alpine landscape: The impact of different agricultural land-use with different biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 98(2), 99-109.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International journal of geographical information science*, 20(7), 703-726.
- Manevski, K., Jakobsen, M., Kongsted, A. G., Georgiadis, P., Labouriau, R., Hermansen, J. E., & Jørgensen, U. (2019). Effect of poplar trees on nitrogen and water balance in outdoor pig production—A case study in Denmark. *Science of the total environment*, 646, 1448-1458.
- McAdam, J. H., Burgess, P. J., Graves, A. R., Rigueiro-Rodríguez, A., & Mosquera-Losada, M. R. (2009). Classifications and functions of agroforestry systems in Europe. In *Agroforestry in Europe* (pp. 21-41). Springer, Dordrecht.
- Mosquera-Losada, M. R., McAdam, J. H., Romero-Franco, R., Santiago-Freijanes, J. J., & Rigueiro-Rodríguez, A. (2009). Definitions and components of agroforestry practices in Europe. In *Agroforestry in Europe* (pp. 3-19). Springer, Dordrecht.
- Mosquera-Losada, M. R., Moreno, G., Pardini, A., McAdam, J. H., Papanastasis, V., Burgess, P. J., ... & Rigueiro-Rodríguez, A. (2012). Past, present and future of agroforestry systems in Europe. In *Agroforestry-The Future of Global Land Use* (pp. 285-312). Springer, Dordrecht.
- Nair, P. R., Nair, V. D., Kumar, B. M., & Showalter, J. M. (2010). Carbon sequestration in agroforestry systems. In *Advances in agronomy* (Vol. 108, pp. 237-307). Academic Press.
- Palma, J. H. (2006). Integrated assessment of silvoarable agroforestry at landscape scale. Wageningen Universiteit.
- Palma, J. H., Graves, A. R., Bunce, R. G. H., Burgess, P. J., De Filippi, R., Keesman, K. J., ... & Reisner, Y. (2007). Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, ecosystems & environment*, 119(3-4), 320-334.
- Prasuhn, V., Kupferschmied, P., Spiess, E., & Hürdler, J. (2016). Szenario-Berechnungen für das Projekt zur Verminderung diffuser Nährstoffeinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Agroscope Zürich.
- Remund, J., & Augustin, S. (2015). Zustand und Entwicklung der Trockenheit in Schweizer Wäldern. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 166(6), 352-360.
- Rigueiro-Rodríguez, A., McAdam, J., & Mosquera-Losada, M. R. (Eds.). (2008). *Agroforestry in Europe: current status and future prospects* (Vol. 6). Springer Science & Business Media.
- Rigueiro-Rodríguez, A., Fernández-Núñez, E., González-Hernández, P., McAdam, J. H., & Mosquera-Losada, M. R. (2009). Agroforestry systems in Europe: productive, ecological and social perspectives. In *Agroforestry in Europe* (pp. 43-65). Springer, Dordrecht.

Sanchez, I. A., & McCollin, D. (2015). A comparison of microclimate and environmental modification produced by hedgerows and dehesa in the Mediterranean region: A study in the Guadarrama region, Spain. *Landscape and Urban Planning*, 143, 230-237.

Schacht, H., Grillmayer, R., & Wöss, M (2002). Entwicklung von fernerkundungsgestützten Methoden zur Erfassung und Bewertung von wildökologischen.

Schoumans, O. F., Chardon, W. J., Bechmann, M. E., Gascuel-Oudou, C., Hofman, G., Kronvang, B., ... & Dorioz, J. M. (2014). Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: a review. *Science of the Total Environment*, 468, 1255-1266.

Schweizerische Eidgenossenschaft (2007). Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz (NHG). <http://www.admin.ch/ch/d/sr/4/451.de.pdf> (abgerufen am 11.1.2020).

Seitz, B., Carrard, E., Burgos, S., Tatti, D., Herzog, F., Jäger, M., & Sereke, F. (2017). Erhöhte Humusvorräte in einem siebenjährigen Agroforstsystem in der Zentralschweiz. *Agrarforschung Schweiz*, 8(7-8), 318-323.

Sereke, F. (2012). Transdisciplinary development of agroforestry systems (Doctoral dissertation, ETH Zurich).

Siriri, D., Wilson, J., Coe, R., Tenywa, M. M., Bekunda, M. A., Ong, C. K., & Black, C. R. (2013). Trees improve water storage and reduce soil evaporation in agroforestry systems on bench terraces in SW Uganda. *Agroforestry systems*, 87(1), 45-58.

Statistisches Amt Kanton Zürich (2020) Gemeindeporträt (Daten auf Ebene Gemeinde, Bezirk, Region und Kanton). Abgerufen am 12.01.20 von [http://www.statistik.zh.ch/internet/justiz\\_innere/statistik/de/daten/gemeindeportraet\\_kanton\\_zuerich.html - a-content](http://www.statistik.zh.ch/internet/justiz_innere/statistik/de/daten/gemeindeportraet_kanton_zuerich.html - a-content)

Surböck, A., Faustmann, P., Heinzinger, M., Friedel, J. K., Klick, A., & Freyer, B. (2005). Auswirkungen einer Hecke auf Bodenwasserhaushalt, Bodenparameter und Ertrag in angrenzenden Ackerflächen. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.*, 17, 20-21.

Sutter, L., Herzog, F., Dietemann, V., Charrière, J. D., & Albrecht, M. (2017). Nachfrage, Angebot und Wert der Insektenbestäubung in der Schweizer Landwirtschaft. *Agrarforschung Schweiz*, 8(9), 332-339.

Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G., & Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, ecosystems & environment*, 230, 150-161.

Trutmann, D., & Sudau, M. (2019). Innenentwicklung in der Stadt Zürich—Instrumente zur Aktivierung von Aufstockungspotentialen. *Swiss real estate journal*, 19, 21-28.

Tsonkova, P., Quinkenstein, A., Böhm, C., Freese, D., & Schaller, E. (2014). Ecosystem services assessment tool for agroforestry (ESAT-A): An approach to assess selected ecosystem services provided by alley cropping systems. *Ecological indicators*, 45, 285-299.

Verein Metropolitanraum Zürich (Hg.) (2014): Siedlungsnahes Freiraumnetz. Der Metropolitanraum Zürich als Parklandschaft. Zürich.

Veste, M., & Böhm, C. (2018). Agrarholz–Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft. Springer Berlin Heidelberg.

Vogt J (1999) Agroforstwirtschaft – eine mögliche Bereicherung der Landnutzungsformen in zwei ausgewählten Regionen. Diplomarbeit an der ETH Zürich, Institut für Pflanzenwissenschaften

Wolz, K. J., Branham, B. E., & DeLucia, E. H. (2018). Reduced nitrogen losses after conversion of row crop agriculture to alley cropping with mixed fruit and nut trees. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 258, 172-181.

Yalew, S. G., Van Griensven, A., & van der Zaag, P. (2016). AgriSuit: A web-based GIS-MCDA framework for agricultural land suitability assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 128, 1-8.

Zimmermann, H. J., & Gutsche, L. (1991). Multi-Criteria-Entscheidungen. In *Multi-Criteria Analyse* (pp. 21-33). Springer, Berlin, Heidelberg.

Zurbuchen, A., Müller, A., & Dorn, S. (2010). Umwelt Kurze Flugdistanzen zwischen Nist- und Nahrungshabitaten fördern eine reiche Wildbienenfauna. *Journal of Pediatric, Maternal & Family Health-Chiropractic*, 1(10), 360.



## 7. Anhang

### 7.1. R-Skript

Das komplette R-Skript wird separat als Programmdatei mit dem Workspace abgegeben.

### 7.2. Korrelation der Kriterien

In der folgenden Tabelle sind die höchsten Korrelationskoeffizienten der Kriterien dargestellt.

Tabelle 8: Dargestellt sind die Werte der Kriterien mit den höchsten Korrelationskoeffizienten.

Kriterium 1	Kriterium 2	Korrelationswert	Methode
Feinstaub Immission (PM10)	Stickoxid Immission (NO2)	0.64	Pearson-Korrelation
Wasserverfügbarkeit für Pflanzen	Bodeneigenschaften	-0.39	Spearman-Korrelation
Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer	Bodeneigenschaften	-0.37	Spearman-Korrelation
Wasserverfügbarkeit für Pflanzen	Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer	-0.31	Pearson-Korrelation
Wasserverfügbarkeit für Pflanzen	Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft	0.29	Spearman-Korrelation
Wasserverfügbarkeit für Pflanzen	Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer	0.24	Pearson-Korrelation
Biodiversität	Bodeneigenschaften	0.20	Spearman-Korrelation
Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer	Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft	0.19	Spearman-Korrelation
Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer	Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer	0.17	Pearson-Korrelation

### 7.3. Rangordnung der Kriterien aus Experteninterviews

Die folgende Tabelle stellt die von den Experten abgegebene Rangordnung der Kriterien dar.

Tabelle 9: Rangordnung der Kriterien: Die Zahlen entsprechen dem Gewichtungscodex und stehen jeweils für ein Kriterium: Bodeneigenschaften = 1, Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer = 2, Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer = 3, Standortbelastung = 4, Wasserverfügbarkeit für Pflanzen = 5, Wildtierkorridore = 6, Biodiversität = 7, Deckungsgrad der Bienen = 8, Ästhetik = 9, Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft = 10, Zugang der Parzelle zur Erholung = 11, Feinstaub Immission (PM10) = 12, Stickoxid Immission (NO2) = 13.

Experte/Expertin	Rangordnung der Kriterien
Sonja Kay	1,4,2,11,10,6,7,12,13,3,9,8,5
Johanna Rüegg	6,9,2,3,7,5,1,10,12,13,4,11,8
Christina Vaccaro	7,6,5,10,11,1,2,3,12,13,4,8,9
Bernhard Koch	1,5,7,2,3,12,9,10,11,8,6,4,13
Katja Degonda	1,4,7,12,13,2,3,8,6,5,11,9,10
Frank Meissner	7,1,10,9,5,12,6,4,11,8,3,2,13
Matthias Brück	5,1,8,10,7,11,2,6,12,3,9,4,13
Phillip Baumann	1,2,8,7,6,3,5,10,11,9,4,13,12
Beatrice Schüpbach	2,3,7,1,8,6,5,9,11,10,13,12,4

## 7.4. Resultate

### 7.4.1. Tabellen der 1000 Parzellen mit den grössten Potentialwerten

Die folgenden Tabellen zeigen die Anzahl Parzellen pro Kategorie zu den vier am stärksten gewichteten Kriterien Bodeneigenschaften (Tabelle 11), Biodiversität, Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer, Wasserverfügbarkeit für Pflanzen (Tabelle 10).

Tabelle 10: Die Nutzungseignungen der 1000 Parzellen mit den höchsten Potentialwerten.

Nutzungseignung	Anzahl Parzellen pro Kategorie	Prozentualer Anteil
1 - Uneingeschränkte Fruchtfolge 1. Güte	10	1.0
2 - Uneingeschränkte Fruchtfolge 2. Güte	38	3.8
3 - Getreidebetonte Fruchtfolge 1. Güte	66	6.6
4 - Getreidebetonte Fruchtfolge 2. Güte	54	5.4
5 - Futterbaubetonte Fruchtfolge	77	7.7
6 - Futterbau bevorzugt, Ackerbau stark eingeschränkt	276	27.6
7 - Gutes bis mässig gutes Wies- und Weideland	254	25.4
8 - Wiesland (wegen Nässe nur zum Mähen geeignet)	82	8.2
9 - Extensives Wies- und Weideland	140	14.0
10 - Streueland	3	0.3
Bereich 1-5	0	0.0
Bereich 2-5	0	0.0
Bereich 7-10	0	0.0

Tabelle 11: Der Diffuse Stickstoffeintrag in Gewässer sowie die Wasserverfügbarkeit und Biodiversität zu den 1000 Parzellen mit den höchsten Potentialwerten.

Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer	Anzahl Parzellen pro Kategorie	Wasserverfügbarkeit für Pflanzen	Anzahl Parzellen pro Kategorie	Biodiversität	Anzahl Parzellen pro Kategorie
$x < 0.25$	142	$x < 0.25$	2	0	0
$0.25 < x < 0.5$	167	$0.25 < x < 0.5$	0	1	1000
$0.5 < x < 0.75$	680	$0.5 < x < 0.75$	402		
$0.75 < x < 1$	11	$0.75 < x < 1$	596		

## 7.4.2. Tabellen der 6894 Parzellen mit den grössten Potentialwerten

Die folgenden Tabellen zeigen die Anzahl Parzellen pro Kategorie zu den vier am stärksten gewichteten Kriterien Bodeneigenschaften, Biodiversität, Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer, Wasserverfügbarkeit für Pflanzen.

Tabelle 12: Die Nutzungseignungen der 6894 Parzellen mit den höchsten Potentialwerten.

Nutzungseignung	Anzahl pro Kategorie	Prozentualer Anteil
1 - Uneingeschränkte Fruchtfolge 1. Güte	112	1.6
2 - Uneingeschränkte Fruchtfolge 2. Güte	459	6.7
3 - Getreidebetonte Fruchtfolge 1. Güte	586	8.5
4 - Getreidebetonte Fruchtfolge 2. Güte	481	7.0
5 - Futterbaubetonte Fruchtfolge	764	11.1
6 - Futterbau bevorzugt, Ackerbau stark eingeschränkt	1915	27.8
7 - Gutes bis mässig gutes Wies- und Weideland	1604	23.3
8 - Wiesland (wegen Nässe nur zum Mähen geeignet)	308	4.5
9 - Extensives Wies- und Weideland	625	9.1
10 - Streuland	21	0.3
Bereich 1-5	9	0.1
Bereich 2-5	8	0.1
Bereich 7-10	2	0.0

Tabelle 13: Der Diffuse Stickstoffeintrag in Gewässer, die Wasserverfügbarkeit und Biodiversität der 6894 Parzellen mit höchsten Potentialwerten.

Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer	Anzahl pro Kategorie	Wasserverfügbarkeit für Pflanzen	Anzahl pro Kategorie	Biodiversität	Anzahl pro Kategorie
<0.25	1998	<0.25	35	0	63
>0.25 <0.5	1313	>0.25 <0.5	8	1	6831
>0.5 <0.75	3568	>0.5 <0.75	3204		
>0.75 <1	15	>0.75 <1	3561		

### 7.4.3. Tabellen zu den Parzellen mit den meisten UD und UV.

Es wurden alle Parzellen mit mehr als neun UD und UV betrachtet (insgesamt 6894). Die Tabellen zeigen die Anzahl Parzellen pro Kategorie zu den vier am stärksten gewichteten Kriterien Bodeneigenschaften, Biodiversität, Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer, Wasserverfügbarkeit für Pflanzen.

Tabelle 14: Die Nutzungseignungen der Parzellen mit den meisten Überlagerungen.

Nutzungseignung	Anzahl pro Kategorie	Prozentualer Anteil
1 - Uneingeschränkte Fruchtfolge 1. Güte	589	8.5
2 - Uneingeschränkte Fruchtfolge 2. Güte	1785	25.9
3 - Getreidebetonte Fruchtfolge 1. Güte	1377	20.0
4 - Getreidebetonte Fruchtfolge 2. Güte	801	11.6
5 - Futterbaubetonte Fruchtfolge	711	10.3
6 - Futterbau bevorzugt, Ackerbau stark eingeschränkt	939	13.6
7 - Gutes bis mässig gutes Wies- und Weideland	447	6.5
8 - Wiesland (wegen Nässe nur zum Mähen geeignet)	75	1.1
9 - Extensives Wies- und Weideland	135	2.0
10 - Streueland	1	0.0
Bereich 1-5	16	0.2
Bereich 2-5	1	0.0
Bereich 7-10	16	0.2

Tabelle 15: Der Diffuse Stickstoffeintrag in Gewässer, die Wasserverfügbarkeit und Biodiversität der 6894 Parzellen, welche die meisten Überlagerungen aufweisen.

Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer	Anzahl pro Kategorie	Wasserverfügbarkeit für Pflanzen	Anzahl pro Kategorie	Biodiversität	Anzahl pro Kategorie
<0.25	2086	<0.25	22	0	189
>0.25 <0.5	2000	>0.25 <0.5	3	1	6704
>0.5 <0.75	2794	>0.5 <0.75	2523		
>0.75 <1	13	>0.75 <1	4295		

## 7.5. Vergleich der Umweltdefizite aus Kay et al. (2019b) und der 13 Kriterien der Masterarbeit

In der folgenden Tabelle sind die Umweltdefizite aus der Publikation von Kay et al. (2019b) und die Kriterien aus der Masterarbeit gegenübergestellt. Übereinstimmungen oder Ähnlichkeit finden sich bei den Themen der Wildtierkorridore, des Deckungsgrads der Bienen und der Nitrat- und Phosphorbelastung.

Tabelle 16: Der Vergleich der Umweltdefizite aus der Publikation von Kay et al. (2019b) und den Kriterien der Masterarbeit.

Umweltdefizite aus der Publikation von Kay et al. (2019b)	Kriterien der Masterarbeit
<b>Biodiversität und Landschaft</b>  Potentielle Wildtierkorridore Ungenügender Deckungsgrad der Honigbienen Potentielles Defizit an Nützlingshabitaten Potentieller Gewässerraum / / / /	<b>Biodiversität und Landschaft</b>  Wildtierkorridore (Perimeter) Deckungsgrad der Bienen (Bienenstöcke) / / Biodiversität Ästhetik Zugang der Parzelle zur Erholung Bereitschaft zur Teilhabe an der Landwirtschaft
<b>Klima und Luft</b>  Erhöhte Ammoniakkonzentration / /	<b>Klima und Luft</b>  / Feinstaub Immission (PM10) Stickoxid Immission (NO <sub>2</sub> )
<b>Wasser</b>  Nitrat-Überschuss Phosphor-Überschuss	<b>Wasser</b>  Diffuser Stickstoffeintrag in Gewässer Diffuser Phosphoreintrag in Gewässer
<b>Boden</b>  Erosionsgefährdung / /	<b>Boden</b>  / Landwirtschaftliche Nutzungseignung Standortbelastung
<b>Klimawandel</b>  Temperaturanstieg Niederschlagsveränderung /	<b>Klimawandel</b>  / / Wasserverfügbarkeit für Pflanzen