



Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg
zum Thema

„Übertragung etablierter Standortbewertungs- verfahren auf den Erdmond zur Beurteilung möglicher Landungs- und Siedlungsgebiete“

vorgelegt von

B.Sc. Marius Walzinger
105485, UNIGIS M.Sc. Jahrgang 2019

Betreuer: Dr. Christian Neuwirth

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science – MSc“

Wolnzach, 26.09.2021

Danksagung

Ich danke meiner Familie für den Halt, den sie mir stets gab. Liebe Reni, vielen Dank, dass du mir allzeit zur Seite standest und ich auf deine Unterstützung immer zählen konnte. Lieber Julius, vielen Dank für die Rückendeckung, die du mir immer gabst. Lieber Roger, vielen Dank für die schönen Nachmittage, die mich wieder auf den Erdboden geholt haben. Liebe Astrid, vielen Dank, dass du mir den Weg aufgezeigt hast, der mich vom Erdboden gelöst hat.

„Per aspera ad astra“

Außerdem möchte ich Herrn Dr. Christian Neuwirth für seine Unterstützung sowie die anregenden Gespräche rund um das Thema der Arbeit und jenseits davon danken. Mein Dank gilt insbesondere auch dem gesamten UNIGIS Team. Ihr Engagement machte das Studium trotz aller Anstrengungen zu einer meiner schönsten Erfahrungen. Die hohe Qualität der Materialien, die Hilfsbereitschaft und der Optimierungswille aller Beteiligten sind herausragend.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die vorliegende Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Bachelor-/ Master-/ Diplomarbeit/ Dissertation eingereicht.

Datum, Unterschrift

Zusammenfassung

In dieser soll Arbeit bewertet werden, ob etablierte Standortbewertungsverfahren auf extraterrestrische Standorte wie den Erdmond übertragen werden können, um einen idealen Startpunkt für Kolonisierungsunternehmungen zu identifizieren. Um diese Frage zu beantworten, wurden folgende Forschungsteilziele gesteckt. (1) Zusammentragen einer geeigneten, extraterrestrischen Datengrundlage, (2) Identifizierung eines etablierten Analyseverfahrens, (3) Festlegung eines Analyseablaufs, der als common practice gelten kann, (4) Wahl geeigneter Softwareprodukte, (5) Durchführung einer extraterrestrischen Standortbewertungsanalyse, (6) Bewertung der Analyseergebnisse. Die Analyse gilt als erfolgreich durchgeführt, wenn die Anwendung der Analyselogik auf die Datengrundlage eine Ergebnisoberfläche erzeugt, die nachvollziehbare, mögliche Landungs- und Siedlungsstandorte eines extraterrestrischen Untersuchungsgebietes liefert. Als Methode soll die weighted linear combination (WLC) zum Einsatz kommen, wobei die relativen Wichtigkeiten der Faktoren durch den analytical hierarchy process (AHP) bestimmt werden. Als Untersuchungsgebiete dienen die Polregionen des Erdmondes von 90 – 88° jeweils nördlicher wie südlicher Breite. Es sollen Gebiete mit möglichst günstigen Faktorkombinationen für Landung und Basisbau identifiziert werden. Als Kriterien werden die Beleuchtungsintensität durch die Sonne, die Entfernung zu Regionen mit möglichem Wassereisvorkommen und die Geländeneigung verwendet. Auch werden exemplarische Siedlungs- und Landepunkte gewählt, um diese durch eine Pfad- und Korridoranalyse mit der Geländeneigung als Kostenfaktor zu verbinden. Es zeigt sich, dass die Pole für Siedlungsvorhaben tendenziell besser geeignet sind als für Landungen, was sich auf die Geländemorphologie zurückführen lässt. Für Siedlungszwecke zeichnen sich vor allem die Ränder großer Krater aus. Dies kann auf die Nähe zu möglichem Wassereisvorkommen zurückgeführt werden, da diese als wichtigste Ressourcenquelle dienen. Die Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass die bis dato etablierten Bewertungsverfahren auf extraterrestrische Standorte übertragen werden können.

Abstract

This work will assess whether established site assessment procedures can be applied to extraterrestrial sites such as the Earth's moon to identify an ideal starting point for colonisation. To answer this question, the following research objectives were set. (1) Collecting a suitable extraterrestrial data base, (2) Identifying an established analysis procedure, (3) Determining an analysis procedure that can be considered common practice, (4) Selecting suitable software products, (5) Conducting an extraterrestrial site assessment analysis, (6) Evaluating the analysis results. The analysis is considered successful if the application of the analysis logic to the data basis produces a result surface that provides comprehensible, possible landing and settlement sites of an extraterrestrial study area. The method used is the weighted linear combination (WLC), whereby the relative importance of the factors is determined by the analytical hierarchy process (AHP). The polar regions of the Earth's moon from 90 - 88° north and south latitude will serve as the study areas. Areas with the most favourable factor combinations for landing and base building are to be identified. The criteria used are the intensity of illumination by the sun, the distance to regions with possible water ice deposits and the slope of the terrain. Exemplary settlement and landing points are also chosen in order to link them to the terrain slope as a cost factor through a path and corridor analysis. It is found that poles tend to be more suitable for settlement than for landings, which can be attributed to the terrain morphology. For settlement purposes, the edges of large craters stand out the most. This can be attributed to the proximity to possible water ice deposits, as these serve as the main source of resources. The results allow the conclusion that the previously established evaluation methods can be transferred to extraterrestrial sites.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Projektgebiet als Vektordatensatz	11
Abbildung 2 Digitales Geländemodell des Nordpols in Metern relativ zum Mondradius	12
Abbildung 3 Neigungskarte des Nordpols in einem Kratergrund in Grad vor der Glättungsoperation	13
Abbildung 4 Neigungskarte des Nordpols in einem Kratergrund in Grad nach der Glättungsoperation	13
Abbildung 5 Binäre Restriktionskarten des Nordpols zur Bestimmung eines Landeplatzes vor (links) und nach der Filterung (rechts)	15
Abbildung 6 Karte einer Beleuchtungsanalyse des Nordpols	16
Abbildung 7 Karte einer Beleuchtungsanalyse des Südpols	16
Abbildung 8 Lochfüllung durch „expand and shrink“ Operation. Blaues Potenzialgebiet mit Artefakten über gefülltem Potenzialgebiet in Violett.....	18
Abbildung 9 Aus der Beleuchtungsanalyse abgeleitete Wasserpotenzialregionen am Nordpol vor (links) und nach der Filterung (rechts).....	18
Abbildung 10 Distanz in Metern zu Wasserpotenzialregionen am Beispiel des Nordpols	19
Abbildung 11 Ablauf der WLC modifiziert nach Malczewski (2000).....	21
Abbildung 12 Vorgehen der Korridorberechnung nach Pinto und Keitt (2009).....	22
Abbildung 13 Wasserdistanzoberfläche vor (links) und nach der Kombination mit der Restriktionsoberfläche (rechts).....	26
Abbildung 14 Exemplarischer Landungspunkt (links, blau) und Siedlungspunkt (rechts, grün) auf der Potenzialregionenkarte des Nordpols.....	28
Abbildung 15 Exemplarischer Landungs- und Siedlungspunkt auf einer Hillshadedarstellung des Nordpols	28
Abbildung 16 Exemplarischer Landungspunkt (links, blau) und Siedlungspunkt (rechts, grün) auf der Potenzialregionenkarte des Südpols.....	29
Abbildung 17 Exemplarischer Landungs- und Siedlungspunkt auf einer Hillshadedarstellung des Südpols.....	29
Abbildung 18 Potenzialregionen für den Basisbau am Nordpol.....	31
Abbildung 19 Potenzialregionen für die Landung am Nordpol	32
Abbildung 20 Hybridkarte der Potenzialregionen für Basisbau und Landung am Nordpol	33
Abbildung 21 Potenzialregionen für den Basisbau am Südpol	34
Abbildung 22 Potenzialregionen für die Landung am Südpol	35
Abbildung 23 Hybridkarte der Potenzialregionen für Basisbau und Landung am Südpol	36
Abbildung 24 Beleuchtungsoberflächen des Nordpols (links) und des Südpols (rechts)	37
Abbildung 25 Pfad- und Korridoranalyse für das exemplarische Lande- und Basisbaugebiet am Nordpol.....	38
Abbildung 26 Pfad- und Korridoranalyse für das exemplarische Lande- und Basisbaugebiet am Südpol.....	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Common practice Verfahren für die WLC nach Malczewski (2000)	20
Tabelle 2 Bewertungsschema der relativen Wichtigkeiten im AHP nach Saaty (1984) 23	
Tabelle 3 Bewertung der relativen Wichtigkeiten der für den Basisbau relevanten Kriterien	24
Tabelle 4 Normalisierte relative Wichtigkeiten der für den Basisbau relevanten Kriterien	24
Tabelle 5 Finale Gewichte der für den Basisbau relevanten Kriterien	24
Tabelle 6 Bewertung der relativen Wichtigkeiten der für die Landung relevanten Kriterien	25
Tabelle 7 Normalisierte relative Wichtigkeiten der für die Landung relevanten Kriterien	25
Tabelle 8 Finale Gewichte der für die Landung relevanten Kriterien	25
Tabelle 9 Statistische Kennwerte der Potenzialregionen für den Basisbau auf dem Nordpol	31
Tabelle 10 Statistische Kennwerte der Potenzialregionen für die Landung auf dem Nordpol	32
Tabelle 11 Statistische Kennwerte der hybriden Potenzialregionen für den Nordpol....	33
Tabelle 12 Statistische Kennwerte der Potenzialregionen für den Basisbau auf dem Südpol	34
Tabelle 13 Statistische Kennwerte der Potenzialregionen für die Landung auf dem Südpol	35
Tabelle 14 Statistische Kennwerte der hybriden Potenzialregionen für den Südpol.....	36
Tabelle 15 Flächengrößen der lichtlosen Bereiche am Nord- und Südpol in Hektar	37
Tabelle 16 Statistische Kennwerte für die Korridoranalyse des Nordpols.....	38
Tabelle 17 Statistische Kennwerte für die Korridoranalyse des Südpols.....	39

Abkürzungen

AHP	analytical hierarchy process
CMTC	conditional minimum transit cost
DGM	Digitales Geländemodell
DTM	digital terrain model
GLD100	Global Lunar Digital Terrain Model
IPA	ideal point analysis
JH	Jahrhundert
KI	künstliche Intelligenz
LOLA	lunar orbiter laser altimeter
LRO	Lunar Reconnaissance Orbiter
LROC	lunar reconnaissance orbiter camera
MCDA	multi criteria decision analysis
MCDM	multiple criteria decision making
MCE	multi criteria evaluation
OWA	ordered weighted averaging
PDS	Planetary Data System
TIFF	tagged image file format
VIMS	Visual and Infrared Mapping Spectrometer
WAC	wide-angle camera
WLC	weighted linear combination

Einheiten

μm Mikrometer

g Fallbeschleunigung

h Stunden

ha Hektar

Hz Hertz

K Kelvin

KM Kilometer

L Liter

m/px Meter pro Pixel

px/deg Pixel pro Grad

nm Nanometer

Inhalt

Danksagung	I
Eidesstattliche Erklärung	II
Zusammenfassung	III
Abstract	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungen	VII
Einheiten.....	VIII
1. Einleitung.....	1
1.1 Stand der Forschung.....	2
1.2 Überblick über die MCE Verfahren	4
1.3 Untersuchungsgebiet	6
1.4 Forschungsfrage	10
2. Methodik.....	10
2.1 Lösungsansatz	10
2.2 Datengrundlage	10
2.2.1 Neigung.....	11
2.2.2 Licht	15
2.2.3 Wasser	16
2.3 Analyseverfahren und -ablauf	19
2.3.1 Analyseverfahren.....	19
2.3.2 Analyseablauf.....	20
2.4 Software	23
2.5 Analyse.....	23
2.5.1 Analytical Hierarchy Process (AHP).....	23
2.5.2 Anpassung der Auflösung (Resampling).....	26
2.5.3 Kombination mit der Restriktionsoberfläche.....	26
2.5.4 Normalisierung.....	27
2.5.5 Gewichtung der Faktoroberflächen	27
2.5.6 Kombination der Faktoroberflächen.....	27
2.5.7 Pfad- und Korridoranalyse	28
3. Ergebnisse.....	31
3.1 Potenzialregionen für Landung und Basisbau auf dem Nordpol.....	31
3.2 Hybridkarte aus den Potenzialregionen für Landung und Basisbau auf dem Nordpol.....	33
3.3 Potenzialregionen für Landung und Basisbau auf dem Südpol	34
3.4 Hybridkarte aus den Potenzialregionen für Landung und Basisbau auf dem Südpol	36
3.5 Licht und Wasser.....	37
3.6 Pfad- und Korridoranalyse	38
3.7 Interpretation der Ergebnisse.....	40
4. Diskussion.....	42
5. Schlussfolgerungen und Ausblick.....	45
Literaturverzeichnis	47

1. Einleitung

Die Kolonisierung neuer Welten ist seit jeher eines der größten Abenteuer, das die Menschheit kennt und eine der wirksamsten Triebfedern technischer Entwicklung. Getrieben von wirtschaftlichen Interessen, aus der Not geboren oder einfach in der dem Menschen angeborenen Neugier begründet, streben wir schon seit Urzeiten danach, das Unbekannte zu erforschen (Wörner, 2019). So wie die Entdeckung neuer Kontinente einst zu den größten Herausforderungen zählte, gilt dies heute für die Besiedelung anderer Planeten. Diese Entdeckungsreisen in sprichwörtlich „neue Welten“ gehen heute wie damals mit einer Vielzahl an Unbekannten einher und sind dadurch mit großen Risiken verbunden. Anders als im 15. Jh. steht uns heute jedoch eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Verfügung, um unsere Ankunft bestmöglich vorzubereiten. Dafür ist es essenziell, vorab Daten zu sammeln und aus diesen Informationen abzuleiten. Aufgrund der enormen Distanzen zu anderen Himmelskörpern ist es notwendig, alle Bedürfnisse vor Ort decken zu können, da eine interplanetare Versorgungslogistik sehr zeitaufwändig und unflexibel wäre. So müssen Ressourcen zur Produktion von Baustoffen, zur Sauerstoff-, Trinkwasser-, Nahrungsmittel- und Energieproduktion *in situ* vorhanden sein (Mazzetti et al., 2019). Jede Unternehmung, die zum Ziel hat, einen anderen Himmelskörper zu erschließen, stößt zwangsläufig auf die Frage, wo sich der ideale Initialpunkt befindet. Auch nachdem dieser Startpunkt gefunden wurde, ist es von Interesse, welche Gebiete in der Umgebung welche Zwecke erfüllen könnten, beispielsweise die Nahrungs- oder Energieproduktion oder das Vorhandensein wichtiger oder wertvoller Ressourcen. Dies einzuschätzen zu können ist für das Gelingen jedes Kolonisierungsunterfanges von entscheidender Bedeutung, auf der Erde wie im All. Die Ursprünge der Standortbewertung hinsichtlich des Nutzungszwecks liegen im beginnenden 20. Jh. und haben damit in der zielgerichteten Geoinformationsverarbeitung eine lange Tradition. Die ersten rechnergestützten Verfahren kamen Mitte des 20. Jh. auf und entwickeln sich seither stetig in verschiedensten Feldern weiter (Malczewski, 2004). In dieser Arbeit sollen etablierte multi criteria evaluation (MCE) Verfahren, die ursprünglich für die Bewertung irdischer Standorte entwickelt wurden, hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere Himmelskörper untersucht werden. Als Beispiel sollen die Pole des Erdmondes Luna dienen. Der Mehrwert, der aus einer Übertragbarkeit hervorginge, bestünde darin, ein weit entwickeltes

Werkzeug für einen essenziellen Schritt der Kolonisierungsplanung anderer Himmelskörper übernehmen zu können.

1.1 Stand der Forschung

Die Möglichkeiten von Landnutzungsanalysen, die der Identifikation eines idealen Standortes für einen bestimmten Nutzungszweck dienen, sind so zahlreich wie die möglichen Nutzungszwecke selbst. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass der Begriff „Landnutzungszweck“ sehr allgemein gehalten ist und damit viel Interpretationsspielraum lässt (Malczewski, 2004). Prinzipiell muss zwischen Landnutzung (land use) und Landbedeckung (land cover) unterschieden werden. Die Tatsache, dass beide Begriffe auch im wissenschaftlichen Kontext häufig synonym füreinander stehen, ist in der Historie begründet. Semantisch können die Begriffe jedoch gut voneinander abgegrenzt werden, da sie sich im Kern fundamental unterscheiden. Die Landnutzung beschreibt den sozio-ökonomischen Zustand eines Ortes, die Landbedeckung dagegen das tatsächliche Material, aus dem die Oberfläche besteht (Comber et al., 2008). Im Rahmen dieser Arbeit kann eine bereits bestehende Landnutzung durch den Menschen auf dem Mond ausgeschlossen werden. Von Interesse sind Verfahren, die mithilfe einer Landbedeckungsklassifizierung Aufschluss darauf geben, wo welche Landbedeckung am sinnvollsten in welche Landnutzung überführt werden könnte. Diese Fragestellung fällt in die Klasse der Standort-Such-Probleme (site search problems). Die Ansätze zur Lösung von Standort-Such-Problemen unterscheiden sich dadurch, ob die exakte Grenze des idealen Gebietes, oder lediglich eine Potenzialregion gefunden werden soll, innerhalb derer wahrscheinlich adäquate Gebiete liegen (Cova and Church, 2000). Dazu kann einerseits eine Eignungskartierung (suitability mapping) vorgenommen werden, in der Gebiete ihrer Eignung entsprechend bewertet werden, oder es können andererseits ungeeignete Gebiete durch land screening eliminiert werden (Cova and Church, 2000). Es muss herausgestellt werden, dass die Standortbewertungsverfahren die Beurteilung eines Standortes lediglich unterstützen und keine vollumfängliche Planung liefern. Vielmehr sollen die Verfahren Daten aufbereiten und diese zu Informationen veredeln. Dabei hängt dieser Veredelungsprozess stark vom Planungsvorhaben und der Planungsperspektive ab. Diese entscheiden, welche Informationen unter Umständen aus der gleichen Datengrundlage abgeleitet werden können. Prinzipiell unterscheidet man zwischen harten Informationen, z.B. Sensordaten, und

weichen Informationen, wie bestimmte Präferenzen der PlanerInnen (Malczewski, 2004). Nach Malczewski (2004) muss sich ein Planungsprozess darauf fokussieren, diese beiden Dimensionen sinnvoll zusammenzuführen. Landnutzungsanalysen haben eine lange Tradition. Alles begann mit zeichnerischen Methoden, wie sie von amerikanischen LandschaftsarchitektInnen um die Jahrhundertwende bereits eingesetzt wurden, welche sich zur realen Überlagerung transparenter Karten weiterentwickelten, um sich schließlich durch die Fortschritte der Hardwaretechnik in den 1970er Jahren in die ersten computer-gestützten Überlagerungsverfahren Verfahren, sog. „computer-assisted overlay mapping“, zu entwickeln (Collins et al., 2001). Die Logik der Verfahren wurde stetig komplexer und ist seit Ende des zwanzigsten Jahrhunderts als „multiple criteria decision making“ (MCDM) oder „multi criteria evaluation“ (MCE) bekannt (Collins et al., 2001). Diese Verfahren kommen im Rahmen einer „multi criteria decision analysis“ (MCDA) zum Einsatz. Die MCDA kombiniert multiple Inputdaten, die räumlicher, aber auch nicht-räumlicher Natur sein können, in einen gebündelten Outputdatensatz, wobei die MCDM-Definitionen oder Entscheidungsregeln die Verbindung zwischen In- und Output herstellen (Malczewski, 2004). Die Entscheidungsregeln können dabei wiederum in die Methodenklassen Multiobjektive und Multiattributive geteilt werden (Malczewski, 1999). Multiattributive Methoden sind, insbesondere für das Rasterdatenmodell, wesentlich einfacher zu implementieren, als die rechnerisch hoch komplexen multiobjektiven Methoden, was zu einer größeren Anzahl von multiattributiven Ansätzen im GIS Kontext führte (Malczewski, 2004).

1.2 Überblick über die MCE Verfahren

Zwei verbreitete Ansätze sind das boolesche Überlappungsverfahren (boolean overlay) sowie die gewichtete lineare Kombination oder kurz WLC. Das boolean overlay bildet jedes Kriterium als boolesche Oberfläche ab, die dann durch logische Operatoren wie UND oder ODER verschnitten werden (Jiang and Eastman, 2000). Bei der WLC werden wiederum stetige Kriterien (Faktoren) standardisiert und anschließend gewichtet und kombiniert (Jiang and Eastman, 2000). Bei der Verwendung verschiedener Vorgehensweisen ist es häufig problematisch, dass sich der Output unterscheiden kann, wie es Jiang und Eastman (2000) beim Vergleich von einer boolean overlay und der WLC Analyse zeigen. Laut Jiang und Eastman (2000) hat die Eignung eines Standortes üblicherweise keinen booleschen Charakter, sondern sollte eher eine stetige Bewertung hinsichtlich der graduellen Erfüllung einer bestimmten gewichteten Kombination von Kriterien sein. Die graduelle Eignung eines Kriteriums kann binär nur schwerlich abgebildet werden, wenn lediglich die booleschen Operatoren wie UND oder ODER zur Verfügung stehen. Deswegen war es notwendig, den Bereich dazwischen in einer geeigneten Form darzustellen. Diesem Problem kann beispielsweise mit geordneten gewichteten Operatoren (ordered weighted operators) begegnet werden. Diese stellen eine Klasse der Mittelwertoperatoren dar und können zwischen dem UND und ODER liegen, wobei im Englischen auch von „ORAND“ Operatoren gesprochen wird (Yager, 1988). Diese Operatoren werden beispielsweise für das ordered weighted averaging (OWA) verwendet. Für dieses wird ein Set von Gewichten erzeugt, wobei das eine die relative Wichtigkeit des Kriteriums für den Entscheider und das andere den Grad der ODER-Haftigkeit des Kriteriums abbildet (Malczewski, 2004). Ein nullprozentiger Grad der ODER-Haftigkeit ist ein boolesches UND und stellt die pessimistischste Variante des Kriterienvergleichs dar (Malczewski, 2004). Umgekehrtes gilt für die optimistische Variante, diese wird durch das boolesche ODER oder eine hundertprozentige ODER-Haftigkeit repräsentiert (Malczewski, 2004). Dies bietet die Möglichkeit den Grad der ODER- bzw. UND-Haftigkeit anzupassen und damit eine Reihe von Standortbewertungen für dasselbe Gebiet durchzuführen, womit das Spektrum von einer optimistischen bis hin zu einer pessimistischen Einschätzung abgedeckt werden kann (Malczewski, 2004). Die relative Wichtigkeit von Kriterien kann auch durch den analytical hierarchy process (AHP) bewertet werden. Dieser wurde als Werkzeug zur Entscheidungsfindung entwickelt und gilt als einer der verbreitetsten Ansätze in diesem Bereich (Vaidya and Kumar, 2006). Der AHP wurde ursprünglich in den 1970ern von

Thomas L. Saaty entwickelt und hat zum Ziel, EntscheiderInnen die Wahl der besten Alternative zu ermöglichen, indem über einen paarweisen Vergleich bestimmter Kriterien deren relative Wichtigkeit auf jeder Hierarchieebene bestimmt wird (Sipahi and Timor, 2010). Die relative Wichtigkeit der Elemente wird dabei nicht durch physikalisch messbare Skalen referenziert, sondern stellt die Wichtigkeit der Elemente zueinander in Beziehung, was eine vergleichsbasierte Entscheidungsfindung ermöglicht (Saaty, 2004). Zuletzt soll noch die ideal point analysis (IPA) beleuchtet werden. Dabei zeichnet sich die beste Alternative dadurch aus, dass sie den minimalen Abstand zum Idealpunkt aufweist, wobei die Distanzen durch die Präferenzen der EntscheiderInnen gewichtet werden, was bedeutet, dass eine erhöhte Distanz zum Idealpunkt eines als wichtig skalierten Faktors stärker in die Bewertung einfließt, als ein „unwichtiger“ Faktor (Carver, 1991). Malczewski (2004) beschreibt neben den hier erwähnten Methoden auch noch Ansätze, die in den Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) fallen und nennt beispielhaft Methoden wie die fuzzy logic techniques, neural networks, evolutionary (genetic) algorithms und cellular automata. Alle Verfahren haben gemein, dass sie auf der Priorisierung durch EntscheiderInnen aufbauen. In der Realität werden Entscheidungen mit großer Tragweite jedoch häufig von Gruppen getroffen. Die beschriebenen Ansätze setzen einen sozialen Konsens innerhalb der EntscheiderInnengruppe voraus. Diesen Konsens zu finden, stellt ein Kernproblem innerhalb von Entscheidungsfindungsprozessen dar (Malczewski, 1996). Im Rahmen dieser Arbeit wird ebenfalls von einem sozialen Konsens ausgegangen. Die Vielfalt an Methoden und der begründete Verdacht, dass die Ergebnisse wahrscheinlich durch die Wahl des Ansatzes beeinflusst werden, erschwert eine nachweisbar ideale Wahl der Untersuchungsmethode (Malczewski, 2004). Im Rahmen dieser Arbeit soll deshalb ein etabliertes und gut untersuchtes Verfahren wie die WLC zum Einsatz kommen und ihre Übertragbarkeit auf extraterrestrische Gebiete bewertet werden. Das Unterkapitel „1.4 Forschungsfrage“ spezifiziert die genaue Zielstellung der Arbeit.

1.3 Untersuchungsgebiet

Mithilfe der Spektroskopie kann nach Clark et al. (2014) auf Planeten oder Monden, deren Atmosphäre eine Analyse ihrer Oberflächen aus dem All zulassen, das Vorkommen bestimmter Mineralien sowie Wasser oder Eis, aber auch Geländeeigenschaften kartiert werden. Daraus lassen sich viele Informationen ableiten, die Rückschlüsse auf vorliegende Standortbedingungen zulassen. In der Summe könnte daraus die Eignung dieser Standorte für einen gewünschten Nutzungszweck bewertet werden. Für die Durchführung einer Standortanalyse sind zwei Punkte von kritischer Bedeutung. Zum einen gilt es zu klären, welche Kriterien in der Analyse berücksichtigt werden sollen. Zum anderen müssen die Kriterien aus einer Datenbasis abgeleitet werden können. Die Übertragung etablierter Standortbewertungsverfahren hinsichtlich möglicher Kolonisierungsstandorte auf dem Mond wird eine wesentlich stärkere Fokussierung auf morphologische, meteorologische und geologische Aspekte erfordern, da einige Kriterien, die in gängigen Verfahren verwendet werden, wie bspw. das Haushaltseinkommen, auf dem Mond keine Relevanz haben (Montgomery and Dragičević, 2016). So wie eine potenzielle Ähnlichkeit morphologischer oder geologischer Kriterien vorliegen kann, z.B. zeigt der Mars eine ähnlich heterogene Oberflächenmineralogie wie die Erde (Clark et al., 2014), so können sich andere Parameter stark von Standorten auf der Erde unterscheiden. Hochenergetische, elektromagnetische Strahlung, Partikelstrahlung (Sonnenwind), Meteoriten, Asteroiden, Temperaturschwankungen zwischen $-240 - +475$ °C, Vakuum oder Gasatmosphäre, Gravitation zwischen $0,002 - 2,5$ g, kein Wind oder durchgehende Stürme, Stäube, Gase oder seismische Aktivitäten sind Bedingungen, die, anders als bei irdischen Standorten, auf dem Mond besonders berücksichtigt werden müssen (Wörner, 2019). Gleichzeitig muss die schwierige Erreichbarkeit in die Planung mit einbezogen werden, da sich daraus besondere Anforderungen an Siedlungsstrukturen ergeben, wie beispielsweise deren Zuverlässigkeit, Strahlungs- und Debrisresistenz, oder Wartungsintervalle (Wörner, 2019). Durch die Vielzahl der zu berücksichtigenden Faktoren, in Kombination mit den hohen Anforderungen an Bauteile und Strukturen, zeigt sich der Mehrwert einer vorhergehenden Analyse des idealen Standortes. Dadurch kann gezielt nach Regionen gesucht werden, die Stärken und Schwächen der derzeitigen Technik optimal berücksichtigen. Tatsächlich ist die Planung von Erschließungsvorhaben des Mondes bereits im vollen Gange. Wörner (2019) beschreibt das Konzept des „Moon village“. Hier können sich Wissenschaftler, aber auch private Unternehmen einbringen. Dabei reicht das Spektrum von

wissenschaftlichen Anwendungen bis hin zum Mondtourismus. Das „Moon village“ ist dabei jedoch nicht als Kolonisierungsprojekt misszuverstehen (Wörner, 2019). Anders ist es bei der Erschließung des Mars. Für die ausgedehnte Erforschung des Weltraums ist nach Ansicht von immer mehr InteressensvertreterInnen weltweit die dauerhafte Präsenz des Menschen auf dem Mars eine Grundvoraussetzung (Borowitz and Battat, 2016). Im Gegensatz zum „Moon village“ macht hier ein umfangreich geplantes Projekt mit dem Ziel der dauerhaften Besiedelung Sinn, da eine Reise zum Mars und wieder zurück zwei Jahre dauern würde, wenn der heutige technische Stand zugrunde gelegt wird. Vergleichsweise kann ein Flug zum Mond und zurück in 7 Tagen bewerkstelligt werden (Wörner, 2019). Der Mond könnte zunächst als „Trockendock“ zur Erprobung von Technologie und Material, aber auch als Sprungbrett zum Mars dienen (Borowitz and Battat, 2016). Unabhängig von Mond oder Mars, ob als Forschungsprojekt oder tatsächliches Kolonisierungsvorhaben geplant, ist es immer von Interesse, welcher Ort für welchen Anwendungszweck tauglich ist. So wie der Mond als Versuchsfeld für Technik und Material dienen kann, kann er es auch für die Bewertung geoinformationsgestützter Analysen sein. Die in dieser Arbeit verwendete Analyse fokussiert sich deshalb auf den Mond als Untersuchungsgebiet. Eine Standortanalyse bewertet das Vorhandensein oder Fehlen verschiedener, bestimmter Kriterien an einem bestimmten Ort, die als wichtig für einen bestimmten Zweck erachtet werden. Die Möglichkeit, Ressourcen *in situ* zu nutzen, ist ein Schlüsselement für Mondmissionen, da sie Risiken und Kosten reduziert (Meurisse et al., 2018). Für die Etablierung einer Siedlung auf dem Mond ist Wasser eine der wichtigsten Ressourcen. Neben dem naheliegenden Einsatz als Trinkwasser bzw. um Pflanzen zu versorgen, wird der Großteil des Wassers für die Sauerstoff- und Treibstoffherstellung benötigt werden (Gibney, 2018). Wasser könnte auf dem Mond in Form von Eis vorliegen, aus dem wiederum elementarer Wasserstoff und Sauerstoff gewonnen werden könnte. Zwar weist der Äquatorbereich kaum Wasser auf, doch lassen Auswertungen des indischen Chandrayaan-1 Orbiters die Vermutung zu, dass die Polregionen und insbesondere deren immer dunkle Kratergründe reich an Wasservorkommen sein könnten (Gibney, 2018). Aber nicht nur Eis, sondern auch das Material der Mondoberfläche selbst könnte als Sauerstoffquelle fungieren. Colwell et al. (2007) beschreiben die Mondoberfläche als eine Mischung aus losen Steinen, Kieselsteinen und Stäuben. Eine solche Kombination von Oberflächenmaterial wird als Regolith bezeichnet. Dieser Staubmantel ist omnipräsent und überall mindestens mehrere Meter mächtig (Colwell et al., 2007). Alle

Missionen von Forschung bis hin zur Besiedelung werden sich vermutlich auf oder innerhalb dieser Staubschicht abspielen, weshalb die Kenntnis ihrer Eigenschaften und deren eventuelle Nutzbarkeit eine wichtige Planungsgrundlage darstellt (Colwell et al., 2007). Da das Material zu durchschnittlich 43% aus Sauerstoff besteht und so gut wie überall auf dem Mond verfügbar ist, könnte daraus Sauerstoff gewonnen werden (Gibney, 2018). Es könnte aber auch als Baustoff verwendet werden. Meurisse et al. (2018) haben versucht, das Material durch reflektierte Sonnenstrahlung in einem 3D Druckverfahren zu Blöcken zu sintern. Dabei betonen Meurisse et al. (2018) die Bedeutung der richtigen Kombination aus Druck und Hitze, damit die Blöcke belastbar genug sind, um für den Basisbau eingesetzt zu werden. Die Verwendung des Mondgesteins als Baumaterial wäre ein Schritt in Richtung der von Mazzetti et al. (2019) empfohlenen *in situ* Produktion. Auch Meurisse et al. (2018) unterstreichen die Bedeutung einer Verwendung vor Ort, da der Transport der Baumaterialien von der Erde zum Mond mit hohen Kosten verbunden wäre, die einen negativen Einfluss auf Durchführbarkeit und Nachhaltigkeit des Außenpostens nehmen würden. Die Omnipräsenz des Mondgesteins ist Grund dafür, dass dieses nicht als Kriterium in der nachfolgenden Analyse berücksichtigt wird. Als Analyse Kriterien werden Wasser, Licht und die Neigung des Geländes definiert.

Wasser

Die Untersuchung der ersten Mondgesteinsproben in den 1960er Jahren legte nahe, dass Wasservorkommen auf dem Mond unwahrscheinlich sind, jedoch zeigten Auswertungen des elektromagnetischen Spektrums der Mondoberfläche starke Absorptionswerte in bestimmten Infrarotbereichen, die für Wasser oder Hydroxyl charakteristisch sind (Lucey, 2009). Clark (2009) beschreibt hohe Absorptionsraten von sonnenbeschienenem Substrat, zum einen im Bereich von $3 \mu m$, was charakteristisch für Wasser ist, und zum anderen nahe $2,8 \mu m$, was das Vorhandensein von Hydroxylgruppen nahelegt. Die ausgewerteten Daten stammen aus dem Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) und legen außerdem eine regional differenzierte Verteilung nahe, wobei die Polregionen einen höheren und die Maria den vermutlich geringsten Wasser- und Hydroxylgehalt aufweisen (Clark, 2009). Auch die Ergebnisse des Moon Mineralogy Mappers deuten darauf hin, dass der Wassergehalt in Richtung der Pole zunimmt (Li and Milliken, 2017). Die Polregionen sind wegen des höheren Wassergehalts interessant, da möglicherweise 9 L

Wasser pro m^3 Mondgestein vorliegen könnten (Mitrofanov et al., 2016). Beobachtungen lassen zudem vermuten, dass in den immer dunklen Kratern der Polregionen Wasser in Form von Eis vorkommen könnte (Feldman et al., 1998). Wassereis ist ein Rohstoff, der sich unkompliziert weiterverarbeiten lassen könnte.

Licht

Sonnenenergie ist der Inbegriff einer nachhaltigen Energiequelle und bietet neben ihrer zuverlässigen Verfügbarkeit weitere Vorteile, wie die Unbedenklichkeit der notwendigen Infrastruktur (Solarzellen und Spiegel) und Werkstoffe (Mondgestein, Atmosphäre, Wasser) (Garcia, 2012; Meurisse et al., 2018). Die Sonnenstrahlung kann dabei als direkter Lieferant elektrischer Energie aus Photovoltaikanlagen dienen, oder als Quelle thermaler Energie, die für Sinterprozesse, zur Gewinnung elektrischer Energie oder von Arbeitsfluiden aus Hitzekonversionsprozessen verwendet werden kann (Garcia, 2012; Mazzetti et al., 2019; Meurisse et al., 2018). Für alle Anwendungen steht dabei die Verfügbarkeit im Vordergrund und diese kann wiederum durch die Wahl eines günstigen Standortes für den Verwendungszweck optimiert werden. Dazu ist die Berücksichtigung der Beleuchtungsverhältnisse vor Ort notwendig. Interessant sind hier vor allem die Polregionen, da es aufgrund der um lediglich $1,5^\circ$ geneigten Rotationsachse des Mondes möglicherweise „peaks of eternal light“ geben könnte, also Bereiche an denen die Sonne niemals untergeht (Koebel et al., 2012).

Neigung

Die Neigung des Geländes soll ebenfalls als Kriterium für die Standortbewertung verwendet werden. Diese spielt insbesondere für Zwecke wie Landung oder Fortbewegung eine Rolle. Je flacher eine Landeregion ist, umso leichter gelingt dieses kritische Manöver. Djachkova et al. (2017) beschränken die maximale Geländeneigung für ein Landegebiet beispielsweise auf 7° . Die Neigung spielt auch für Fahrzeuge eine wichtige Rolle, die je nach Bauart oder Verwendungszweck bestimmte maximale Steigfähigkeiten aufweisen (Mateo Sanguino, 2017). Die Berücksichtigung der Geländeneigung kann dazu beitragen, Material zu schonen bzw. stellt eine Restriktion dar, beispielsweise in Form von Steilwänden.

1.4 Forschungsfrage

In dieser Arbeit soll bewertet werden, ob etablierte Standortbewertungsverfahren, wie die WLC, auf extraterrestrische Standorte wie den Mond übertragen werden können, um einen idealen Startpunkt für Kolonisierungsunternehmungen zu identifizieren.

2. Methodik

2.1 Lösungsansatz

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, zu bewerten, ob etablierte Verfahren, die dazu entwickelt wurden, irdische Standorte hinsichtlich bestimmter Nutzungszwecke zu klassifizieren, auch auf extraterrestrische Standorte übertragen werden können. Um diese Frage zu beantworten, wurden folgende Forschungsteilziele gesteckt. (1) Zusammentragen einer geeigneten, extraterrestrischen Datengrundlage, (2) Identifizierung eines etablierten Analyseverfahrens, (3) Festlegung eines Analyseablaufs, der als common practice gelten kann, (4) Wahl geeigneter Softwareprodukte, (5) Durchführung einer extraterrestrischen Standortbewertungsanalyse, (6) Bewertung der Analyseergebnisse.

Die Analyse gilt als erfolgreich durchgeführt, wenn die Anwendung der Analyselogik auf die Datengrundlage eine Ergebnisoberfläche erzeugt, die nachvollziehbare, mögliche Landungs- und Siedlungsstandorte eines extraterrestrischen Untersuchungsgebietes liefert.

2.2 Datengrundlage

Dieser Abschnitt behandelt das Forschungsteilziel (1) Zusammentragen einer geeigneten, extraterrestrischen Datengrundlage. Es müssen Datensätze identifiziert werden, die es ermöglichen, Faktor- und Restriktionsoberflächen abzuleiten. Für die Analysen werden die Polregionen des Mondes von $90,00 - 88,00^\circ$ jeweils nördlicher, wie südlicher Breite gewählt. Die Abbildungen der beiden Pole liegen in einer stereographischen Projektion vor. Für die Pole existieren neben einem hochaufgelösten Geländemodell auch Rasterdatensätze, die die Beleuchtungsverhältnisse darstellen. Außerdem kann nach Feldman et al. (1998) davon ausgegangen werden, dass sich die wesentlichen Wasservorkommen in den Polregionen in den immer dunklen Kratern befinden. Zunächst wird ein Vektordatensatz im Shapeformat erzeugt, der das Projektgebiet abbildet (Abbildung 1).

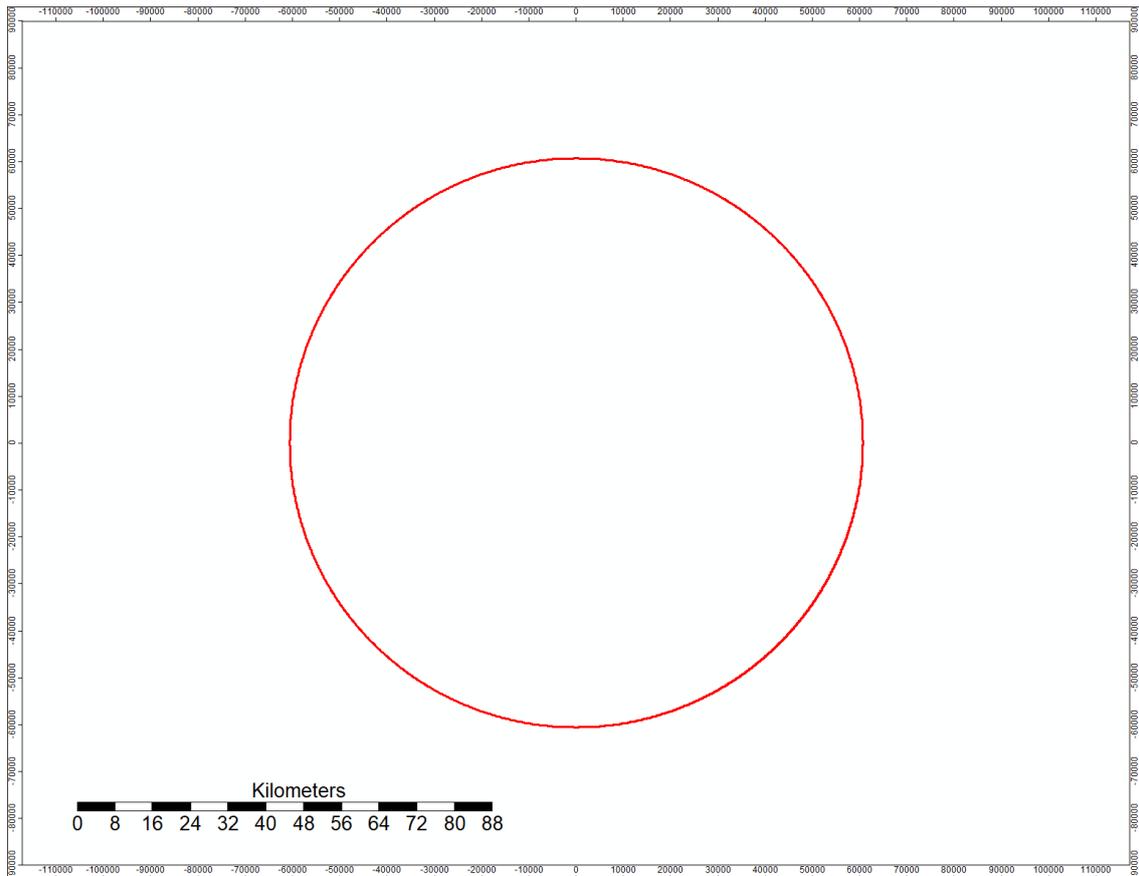


Abbildung 1 Projektgebiet als Vektordatensatz

2.2.1 Neigung

Um die Neigung als Faktor verwenden zu können, muss diese zunächst aus dem digitalen Geländemodell (DGM, engl. DTM) des Mondes errechnet werden. Da auch lokale Maxima hinsichtlich der Steigung wichtig sind, um die Potenzialregionen der Landungsgebiete zu identifizieren, wird das hochaufgelöste DGM des Lunar Orbiter Laser Altimeters (LOLA) verwendet. Dieser Sensor ist Teil der Sensorpalette des Lunar Reconnaissance Orbiters (LRO) und stellt ein Mehrstrahl-Laser gestütztes Altimeter dar, das im Wellenlängenbereich $1064,4 \text{ nm}$ und mit einer Pulsrate von 28 Hz agiert (Smith et al., 2010). Dieses kann wiederum über das Planetary Data System (PDS) bezogen werden ("PDS Data Portal," 2021). Die entsprechenden ProductID's lauten für den Nordpol „LDEM_875N_5M“ und für den Südpol „LDEM_875S_5M“. Weitere Informationen der Datensätze können ihrer zugehörigen Labeldatei entnommen werden. Diese kann ebenfalls über das PDS bezogen werden. Die Datensätze haben eine Auflösung von $6064,67 \text{ px/deg}$ im Maßstab 5 m/px und werden im JPEG2000 Format bezogen. Aus diesen wird

wiederum das Projektgebiet ausgeschnitten, das sich von $90,00 - 88,00^\circ$ nördlicher, wie südlicher Breite erstreckt. Der ausgeschnittene Bereich wird im TIFF Format exportiert. Abbildung 2 zeigt das DGM am Beispiel des Nordpols.

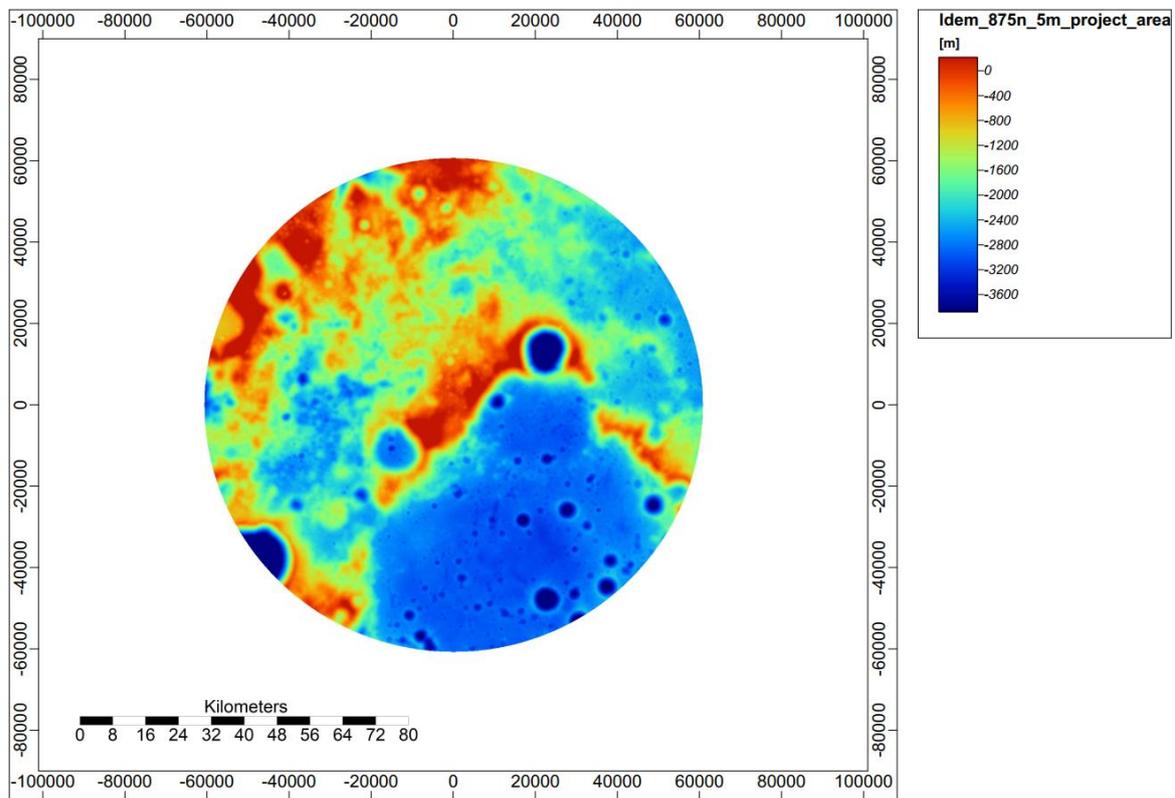


Abbildung 2 Digitales Geländemodell des Nordpols in Metern relativ zum Mondradius

Für die Untersuchungsgebiete werden im Anschluss die Neigungskarten errechnet. Abbildung 3 zeigt die Neigungskarte des Nordpols in einem Kratergrund. Die Steigung wird in Grad dargestellt. Im letzten Schritt wird ein Glättungsoperator (Gauß-Filter) auf die Neigungsoberfläche angewandt, um die scharfen Neigungskanten zu glätten und eine durchgängige Oberfläche zu erhalten. Dieser wird mit einer Standardabweichung von 1 und einem runden Suchmodus mit Radius 2 parametrisiert. Abbildung 4 zeigt die geglättete Neigungskarte des Nordpols in einem Kratergrund. Damit ergeben sich für das Kriterium Neigung zwei Rasteroberflächen für den Bereich $90,00 - 88,00^\circ$ entsprechend nördlicher bzw. südlicher Breite, mit einer Auflösung von 5 m/px im TIFF Format.

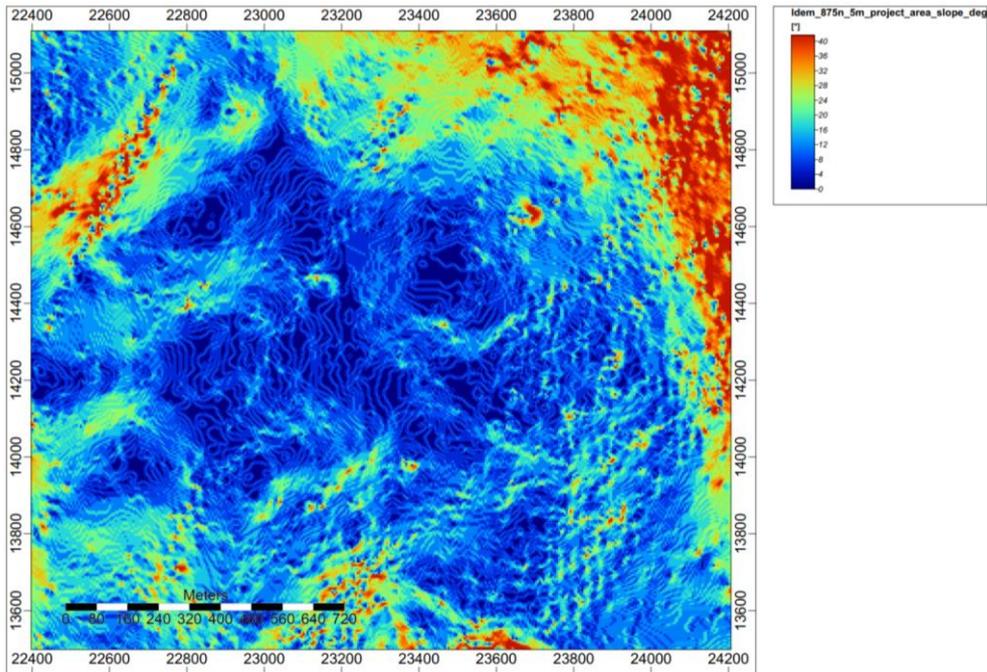


Abbildung 3 Neigungskarte des Nordpols in einem Kratergrund in Grad vor der Glättungsoperation

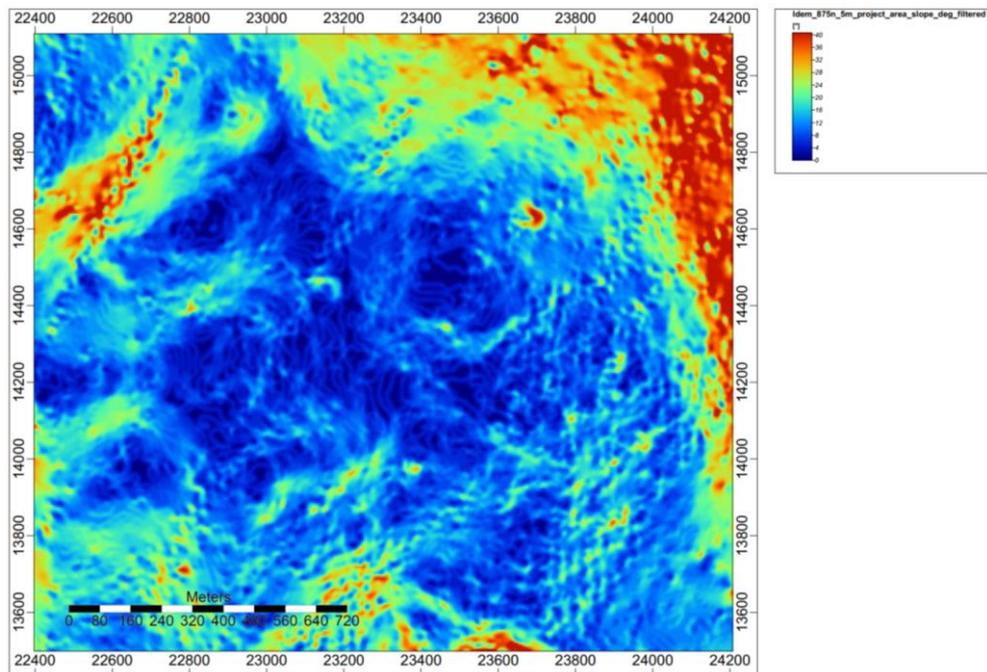


Abbildung 4 Neigungskarte des Nordpols in einem Kratergrund in Grad nach der Glättungsoperation

Des Weiteren wird aus den geglätteten Neigungskarten eine Restriktionsoberfläche erzeugt. Djachkova et al. (2017) beschreiben, dass die Neigung des Geländes für eine reibungslose Landung nicht mehr als 7° geneigt sein sollte. Da diese Anforderung nicht zwangsläufig für alle Landungen gelten muss, wird die maximale Steigung zu Erstellung der Restriktionskarte auf einen frei gewählten Wert von 14° gesetzt. Zunächst wird das DGM an die Auflösung für die spätere Auswertung angepasst (100 m/px). Anschließend erhalten alle Bereiche kleiner 14° Neigung den Wert 1, alle stärker geneigten Bereiche den Wert 0. Aufgrund fehlender Energieversorgung werden die immer dunklen Bereiche zusätzlich aus den potenziellen Landungsgebieten ausgeschlossen. Dies kann durch die Überlagerung mit der ungefilterten Wasserpotenzialkarte erreicht werden (vgl. Abbildung 9 links). Diese Ergebnisoberflächen werden im letzten Schritt gefiltert, um das Rauschen zu reduzieren und zu kleine Landungsbereiche vorab auszuschließen. Djachkova et al. (2017) gehen von einer Landeellipse von 15 mal 30 km aus, was umgerechnet 45000 ha entspräche. Dies könnte jedoch auch richtungsabhängig sein und wird unter Umständen durch die Missionsplanung vorgegeben. Deshalb wird diese erweiterte Anforderung noch nicht in der Vorbereitung der Datengrundlage berücksichtigt. Um das Rauschen des Rasters zu reduzieren, wird dennoch das Filterkriterium von mindestens 100 zusammenhängenden Pixeln angesetzt. Dies entspricht bei der vorhandenen Auflösung einer Fläche von 100 ha. Daraus ergeben sich zwei binäre Restriktionsoberflächen für den Bereich $90,00 - 88,00^\circ$ entsprechend nördlicher bzw. südlicher Breite, mit einer Auflösung von 100,00 m/px im TIFF Format. Abbildung 5 zeigt links die ungefilterte und rechts die gefilterte finale Restriktionskarte am Beispiel des Nordpols.

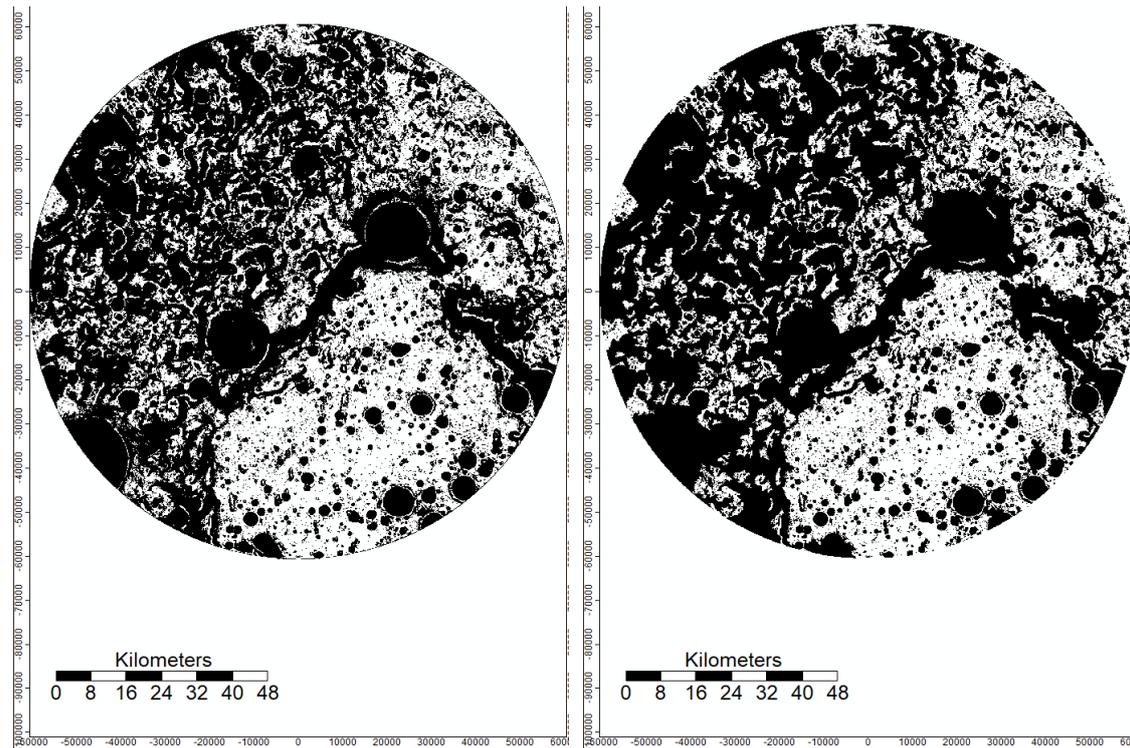


Abbildung 5 Binäre Restriktionskarten des Nordpols zur Bestimmung eines Landeplatzes vor (links) und nach der Filterung (rechts)

2.2.2 Licht

Der Faktor Licht wird durch eine Faktoroberfläche abgebildet. Dazu werden für Nord- und Südpol bereits durchgeführte Beleuchtungsanalysen, bzw. deren Ergebnisoberflächen verwendet. Diese liefern Bereiche, die das Sonnenlicht nie erreicht, aber auch Bereiche, die für ca. 94 % des Mondjahres im Sonnenlicht und nur für 43 Stunden im Dunklen liegen (Speyerer and Robinson, 2013). Da beide Polregionen untersucht werden sollen, wird jeweils die entsprechende Beleuchtungsanalyse für den Bereich $90,00 - 88,00^\circ$ entsprechend nördlicher bzw. südlicher Breite, mit einer Auflösung von $100,00 \text{ m/px}$ mit 8 Bit Samplingtiefe im TIFF Format verwendet. Die Datensätze können über das Produktportal des LROC Systems direkt als Download bezogen werden (“LROC Data Portal,” 2021). Weitere Informationen der Datensätze können ihrer zugehörigen Labeldatei entnommen werden. Diese kann ebenfalls über das Produktportal bezogen werden. Anschließend wird der NoData Wert beider Oberflächen auf -99999 geändert, da dieser zunächst auf 0 festgesetzt war. Abbildung 6 und 7 zeigen die Beleuchtungskarten der beiden Pole. Die Bereiche in Lila stellen diejenigen ewiger Dunkelheit dar.

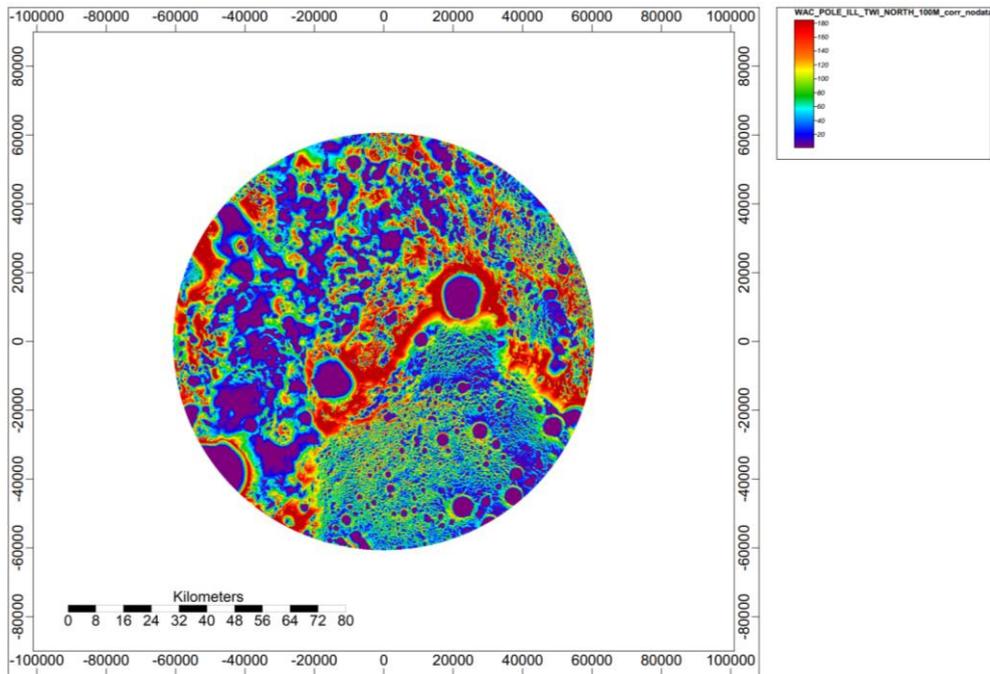


Abbildung 6 Karte einer Beleuchtungsanalyse des Nordpols

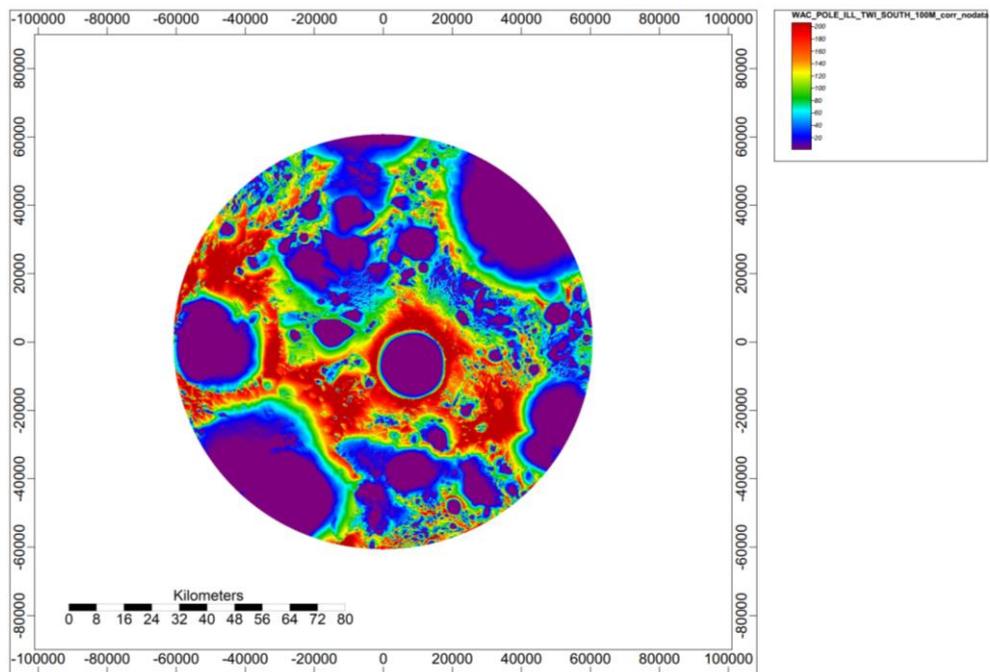


Abbildung 7 Karte einer Beleuchtungsanalyse des Südpols

2.2.3 Wasser

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wasservorkommen in den Polregionen am reichsten sind. In dieser Analyse wird das Kriterium Wasser aus der Beleuchtungsanalyse abgeleitet. Die immer dunklen Kratergründe können aus den Beleuchtungskarten gut

lokalisiert werden und liefern somit Potenzialgebiete für das Kriterium Wasser. Nach Feldman et al. (1998) kann davon ausgegangen werden, dass in den immer dunklen Bereichen der Pole Wasser in Form von Eis zu finden sein könnte. Aus dem Beleuchtungsraster wird daher eine neue Oberfläche erzeugt. Alle Zellen, die in der Beleuchtungsanalyse den Wert 1 haben, also für ewige Dunkelheit stehen, behalten diesen. Alle anderen Rasterzellen erhalten den NoData Wert. Laut Labeldatei des Datensatzes, kann es zu Artefakten innerhalb der immer dunklen Bereiche kommen, die ignoriert werden können. Diese Artefakte werden mithilfe einer „Expand and Shrink“ Operation entfernt. Es wird ein kreisrunder Suchmodus mit Radius 2 und die Mittelwertmethode verwendet. In Abbildung 8 ist zu erkennen, wie die Artefakte (Löcher) in den Potenzialregionen aufgefüllt werden. Die bearbeiteten Potenzialflächen (Violett) liegen unter den ursprünglichen (blau). An den Randbereichen fällt aber auch auf, dass sich die Fläche der Potenzialregionen durch diese Operation vergrößert. Dies führt zu einer systematischen Überschätzung der Gesamtfläche. Im Rahmen dieser Arbeit wird dies jedoch vernachlässigt. Abbildung 9 (links) zeigt die binäre Ergebnisoberfläche mit den Potenzialregionen für Wasservorkommen. Der Rasterdatensatz wird außerdem gefiltert, um zu kleine Bereiche auszuschließen. Dies soll sicherstellen, dass die Bereiche zur Ausbeutung der Wasservorräte groß genug sind. Als Grenzwert wird eine Mindestfläche von 100 ha gewählt, was bei einer Auflösung von 100 m/px einer Mindest rasterzellenanzahl von 100 entspricht. Dieser Wert wurde frei gewählt. Abbildung 9 (rechts) zeigt die Wasserpotenzialregionen mit einer Mindestgröße von 100 ha. Zuletzt kann aus der gefilterten Wasserpotenzialkarte eine Oberfläche berechnet werden, die für das Untersuchungsgebiet die Entfernung zu den Wasserquellen abbildet. Diese finale Rasteroberfläche soll als Faktoroberfläche für die WLC dienen. Abbildung 10 zeigt das auf das Projektgebiet zugeschnittene Raster. Damit ergaben sich für das Kriterium Wasser zwei Rasteroberflächen für den Bereich 90,00 – 88,00 ° entsprechend nördlicher bzw. südlicher Breite, mit einer Auflösung von 100,00 m/px im TIFF Format.

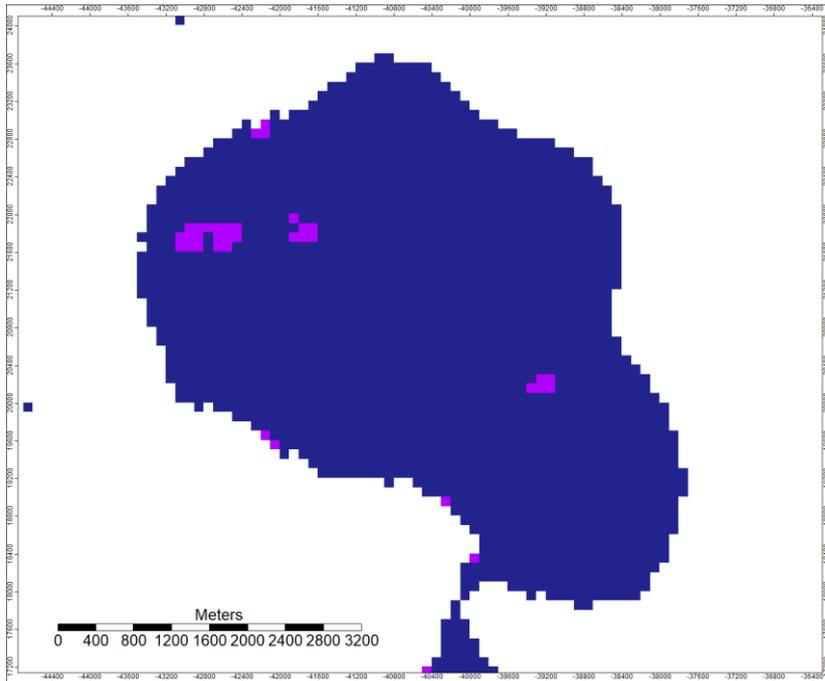


Abbildung 8 Lochfüllung durch „expand and shrink“ Operation. Blaues Potenzialgebiet mit Artefakten über gefülltem Potenzialgebiet in Violett

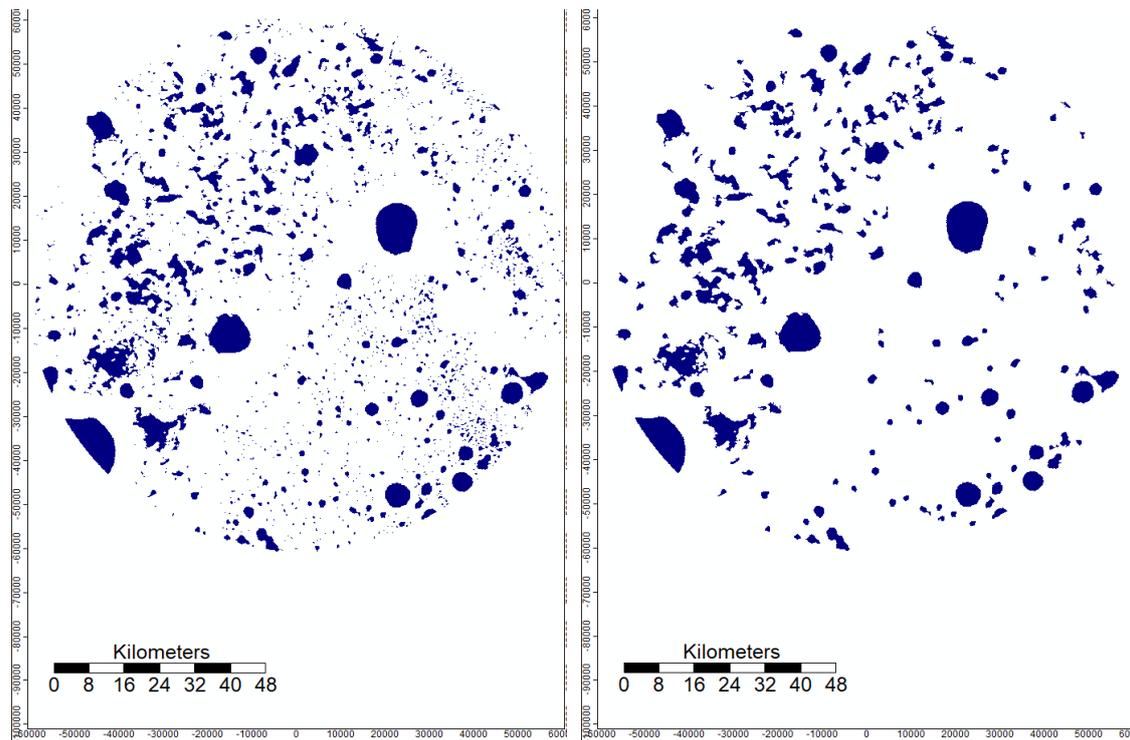


Abbildung 9 Aus der Beleuchtungsanalyse abgeleitete Wasserpotenzialregionen am Nordpol vor (links) und nach der Filterung (rechts)

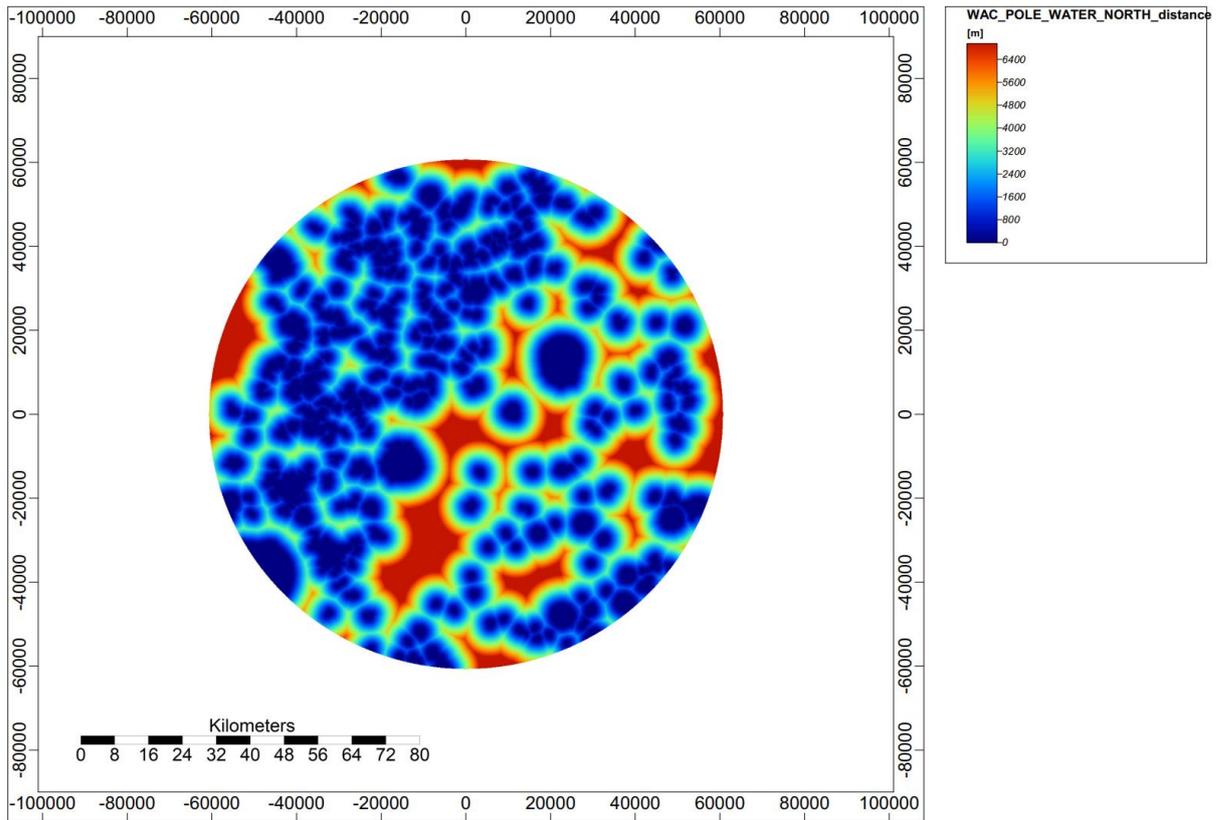


Abbildung 10 Distanz in Metern zu Wasserpotenzialregionen am Beispiel des Nordpols

2.3 Analyseverfahren und -ablauf

Dieser Abschnitt behandelt die Forschungsteilziele (2) Identifizierung eines etablierten Analyseverfahrens und (3) Festlegung eines Analyseablaufs, der als common practice gelten kann.

2.3.1 Analyseverfahren

Ein weit verbreitetes Verfahren, um Standortbewertungen durchzuführen ist die WLC. Diese kann, insbesondere im GIS Kontext, als etabliertes Entscheidungsmodell angesehen werden (Jiang and Eastman, 2000; Malczewski, 2000; Shao et al., 2020). Aus diesem Grund wird dieses Verfahren zur Beantwortung der Forschungsfrage gewählt. Um die Übertragbarkeit zu prüfen, soll außerdem möglichst nach common practice verfahren werden. Tabelle 1 zeigt die sechs Schritte, die nach Malczewski (2000) in einer WLC Analyse als common practice gelten können.

Tabelle 1 Common practice Verfahren für die WLC nach Malczewski (2000)

Vorgehen bei der WLC	Common practice
Identifizierung von Kriterienoberflächen	Abhängig von Datenverfügbarkeit
Ermittlung geeigneter Alternativen (Rasterzellen) pro Oberfläche	Alternativen in Form einzelner Rasterzellen
Anpassung der Kriterienoberflächen in Dimensionierung	Durch einfache Normalisierungsverfahren
Bestimmung der Kriteriengewichte	Direkte Zuweisung oder durch paarweise Vergleichsmethoden
Kombination der Oberflächen mit Gewichten und den anderen Oberflächen	Überlagerungsverfahren
Bestimmung der Rangfolge der Alternativen	Ordnung der Zellen nach Eignungswert

2.3.2 Analyseablauf

Weighted Linear Combination (WLC)

Nachdem der Basisdatensatz zusammengetragen und vorbereitet wurde, kann mit der Analyse begonnen werden. Der Ablauf orientiert sich an den Schritten, die in Tabelle 1 aufgeführt werden und stellt den nach Malczewski (2000) empfohlenen Ablauf dar. Die zugrundeliegende Logik wird beibehalten, die Reihenfolge der Schritte leicht variiert. Dies hat jedoch keine Auswirkung auf die Ergebnisse. Zunächst werden die spezifischen Gewichte der Kriterien in Abhängigkeit des Vorhabens bestimmt. Die Wichtigkeit von Wasser bzw. der Geländeneigung unterscheidet sich in Abhängigkeit der Planungsperspektive. Eine gute Erreichbarkeit ausbeutbarer Ressourcen ist beim Basisbau von entscheidender Bedeutung. Umgekehrt stellt die Neigung des Geländes bei der Landung eines der wichtigsten Kriterien dar (Djachkova et al., 2017). Für die Bestimmung der Wichtigkeit der Kriterien wird auf die paarweise Vergleichsmethode AHP zurückgegriffen. Der nächste Schritt besteht darin, die Auflösung der Oberflächen durch Resampling aneinander anzupassen. Falls vorhanden wurden die Oberflächen mit den Restriktionsoberflächen multipliziert. Eine solche wird für die Berechnung der Landungspotenzialgebiete verwendet, um zu steile Bereiche auszumaskieren. Damit liegt das Set aus geeigneten Rasterzellen vor. Als nächstes werden die Oberflächen normalisiert. Dabei werden alle Rasterzellenwerte in den Bereich zwischen 0 – 1 skaliert, wobei der kleinste Wert der Oberfläche den Wert 0, der größte den Wert 1 annimmt. Nun können die Oberflächen

gewichtet werden. Dazu werden alle Rasterwerte der Oberfläche mit dem im AHP bestimmten Gewicht multipliziert. Anschließend werden die Oberflächen durch Addition miteinander kombiniert. Dieses Vorgehen liefert jeweils eine Oberfläche mit Landungspotenzialgebieten sowie Siedlungspotenzialgebieten, jeweils für den Nord- und Südpol des Mondes im Bereich von 90 – 88 ° nördlicher bzw. südlicher Breite. Abbildung 11 zeigt das beschriebene prinzipielle Vorgehen piktographisch. Außerdem wird eine Hybridkarte erzeugt, die die Landungspotenzialgebiete und die Siedlungspotenzialgebiete kombiniert. Dazu können die Faktoroberflächen der Analyse der Landungspotenzialregionen verwendet werden. Der Vergleich der Lande- und Basisgebiete geschieht über die unterschiedliche Gewichtung der Faktoren. Die normalisierten und mit der Restriktionsoberfläche der Landungsgebiete multiplizierten Oberflächen müssen also nur einmal aus der Perspektive des Basisbaus und einmal aus der Perspektive der Landung gewichtet werden. Um zu verhindern, dass der Eignungswert der Hybridoberflächen größer als 1 wird, und um die Bedeutung von Landung und Siedlung in der Ergebnisoberfläche gleichwertig zu berücksichtigen, werden die Ergebnisoberflächen zuletzt mit dem Faktor 0,5 gewichtet. Schließlich werden die Ergebnisoberflächen addiert.

Analyseablauf

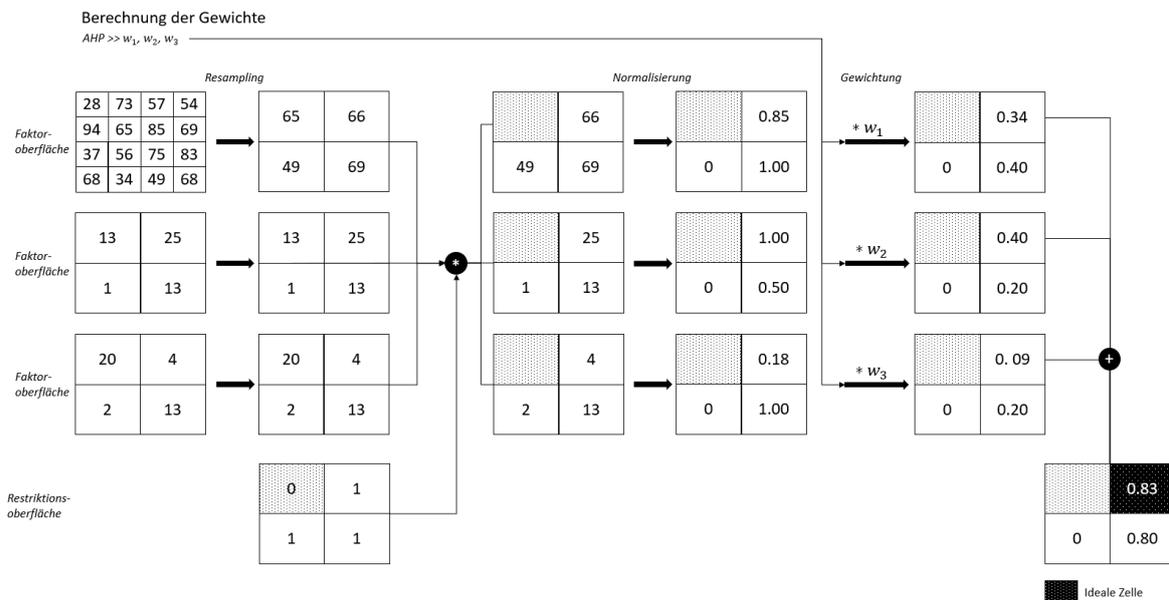


Abbildung 11 Ablauf der WLC modifiziert nach Malczewski (2000)

Pfad- und Korridoranalyse

Auf die aus der Forschungsfrage resultierenden Ergebnisse soll zusätzlich eine least-cost path sowie eine Erweiterung dieser, eine Conditional Minimum Transit Cost Analyse (CMTC) aufgesetzt werden (Pinto and Keitt, 2009). Hintergrund dieser zusätzlichen Analyse ist, die Potenzialregionenkarten von Landung und Basisbau zusammenzuführen. Die least-cost path Analyse wird im Folgenden als Pfadanalyse, die CMTC Analyse als Korridoranalyse bezeichnet. Das Vorgehen richtet sich nach dem, wie es Pinto und Keitt (2009) beschrieben haben (vgl. Abbildung 12). Ziel ist es, den günstigsten Weg sowie einen Korridor zwischen idealem Landungsgebiet und idealem Siedlungsgebiet an Nord- und Südpol exemplarisch zu berechnen. Dieser Korridor beinhaltet dabei alle Routen, die maximal 10 % Mehrkosten im Sinne des Kostenfaktors ausmachen. Als Kostenfaktor dient die Neigung des Geländes. Zunächst wird dazu ein geeignetes Siedlungs- und Landungsgebiet an Nord- und Südpol ausgewählt und in Form zweier Punktdatensätze gespeichert. Anschließend werden die Neigungskarten der Pole in ihrer Auflösung und Ausdehnung an die Ergebnisoberflächen angepasst. Im nächsten Schritt werden aus den Neigungskarten die zu steilen Bereiche ausmaskiert. Der derzeitige Stand der Technik ermöglicht es Rovern, Steigungen zwischen 15 und 30 ° Neigung zu bewältigen (Mateo Sanguino, 2017). Für die Pfadanalyse wird nun eine akkumulierte Kostenoberfläche ausgehend vom Basisstandort errechnet. Mithilfe dieser kann nun der günstigste Pfad von Landungsplatz zu Basisstandort berechnet werden. Für die Korridoranalyse muss eine weitere akkumulierte Kostenoberfläche berechnet werden, dieses Mal ausgehend vom Landeplatz. Im nächsten Schritt werden die akkumulierten Kostenoberflächen addiert. Anschließend wird die Oberfläche reklassifiziert, sodass sie nur noch die Zellen enthält, deren Zellwert 10 % über dem Minimum der Gesamtoberfläche liegt. Abweichend von Pinto und Keitt (2009) wird der finale, reklassifizierte Korridor mithilfe von Formel 2 normalisiert, anstatt durch das Maximum der Oberfläche dividiert zu werden. Dies hat einen rein ästhetischen Hintergrund, da alle Werte auf diese Weise zwischen 0 und 1 liegen.

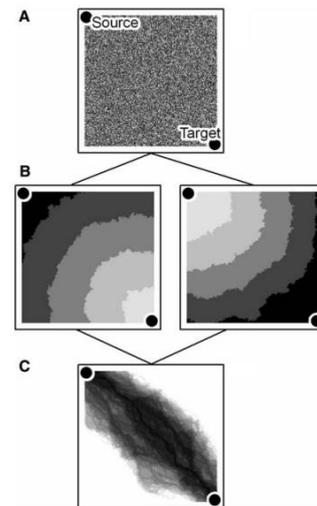


Fig. 2 Illustration of the procedure for calculating the CMTC. a Relative cost grid. b The cumulative cost grid for the target (left) and the source (right). Lighter shades indicate lower cumulative cost. c The two grids from (b) are added to produce the CMTC grid

Abbildung 12 Vorgehen der Korridorberechnung nach Pinto und Keitt (2009)

2.4 Software

Dieser Abschnitt behandelt das Forschungsteilziel (4) Wahl geeigneter Softwareprodukte. Für die Vorbereitung der Datengrundlage sowie die Durchführung der WLC wird auf das OpenSource GIS SAGA GIS in der Version 2.3.2 für 64-Bit Architektur zurückgegriffen. Der AHP wird mithilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel durchgeführt.

2.5 Analyse

Dieser Abschnitt behandelt das Forschungsteilziel (5) Durchführung einer extraterrestrischen Standortbewertungsanalyse.

2.5.1 Analytical Hierarchy Process (AHP)

Zunächst werden die Gewichte der einzelnen Kriterien ermittelt. Dieser Gewichtungprozess folgt der Logik des AHP. Tabelle 2 zeigt das übliche Bewertungssystem der relativen Wichtigkeiten der Kriterien zueinander, welches auch in dieser Analyse verwendet wurde (Saaty, 1984).

Tabelle 2 Bewertungsschema der relativen Wichtigkeiten im AHP nach Saaty (1984)

Faktor der relativen Wichtigkeit	Bedeutung
1	Kriterium gleich wichtig
3	Kriterium leicht wichtiger
5	Kriterium erfahrungsgemäß wichtiger
7	Kriterium real erkennbar wichtiger
9	Maximale Wichtigkeit des Kriteriums

Die Werte 2, 4, 6, 8 stellen eine Möglichkeit der Kompromissfindung dar. Die Kriterien werden in Form einer Matrix notiert und ihre relative Wichtigkeit zueinander bewertet. Dabei wird das Kriterium in der entsprechenden Zeile hinsichtlich seiner relativen Wichtigkeit gegenüber des in der Spalte stehenden verglichen. Dadurch ergeben sich nach und nach die relativen Wichtigkeiten zueinander. Durch die Reziprozität der Wichtigkeiten müssen insgesamt 3 Bewertungen vorgenommen werden. Die Anzahl der durchzuführenden Bewertungen kann nach Saaty (1984) mithilfe von Formel 1 bestimmt werden.

$$\frac{n * (n-1)}{2} \quad (1)$$

Dabei steht n für die Anzahl der zu bewertenden Kriterien.

AHP für den Basisbau

Für den Basisbau soll die Distanz zu Wasser als wichtigstes Kriterium gelten, weshalb im Vergleich zu Licht der Wert 3 und im Vergleich zur Neigung der Wert 5 verliehen wird. Damit bleibt nur noch die Bewertung von Licht zu Neigung ausstehend. Licht wird als wichtiger als Neigung erachtet, weshalb der Wert 3 vergeben wird. Im nächsten Schritt werden die relativen Wichtigkeiten in den Spalten mithilfe der Spaltensummen normalisiert. Zuletzt werden die Zeilensummen durch die Anzahl der Kriterien dividiert, was das spezifische Gewicht des Kriteriums liefert. Tabelle 3 zeigt die Bewertung der Kriterien zueinander inklusive der zugehörigen Spaltensummen.

Tabelle 3 Bewertung der relativen Wichtigkeiten der für den Basisbau relevanten Kriterien

rel. Wichtigkeit	Distanz zu Wasser	Licht	Neigung
Distanz zu Wasser	1,00	3,00	5,00
Licht	0,33	1,00	3,00
Neigung	0,20	0,33	1,00
Summe Spalten:	1,53	4,33	9,00

Tabelle 4 zeigt die mithilfe der Spaltensummen normalisierten relativen Wichtigkeiten der Kriterien zueinander.

Tabelle 4 Normalisierte relative Wichtigkeiten der für den Basisbau relevanten Kriterien

rel. Wichtigkeit (norm.)	Distanz zu Wasser	Licht	Neigung
Distanz zu Wasser	0,65	0,69	0,56
Licht	0,22	0,23	0,33
Neigung	0,13	0,08	0,11
Summe Spalten:	1,00	1,00	1,00

Tabelle 5 zeigt die berechneten Gewichte, welche die Summen der Zeilen dividiert durch die Anzahl der Kriterien darstellen.

Tabelle 5 Finale Gewichte der für den Basisbau relevanten Kriterien

Gewichte Kriterien	Distanz zu Wasser	Licht	Neigung	Summe Zeilen	Gewicht
Distanz zu Wasser	0,65	0,69	0,56	1,90	0,63
Licht	0,22	0,23	0,33	0,78	0,26
Neigung	0,13	0,08	0,11	0,32	0,11
Summe Spalten:	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00

AHP für die Landung

Im Gegensatz zum Basisbau haben Potenzialregionen für die Landung andere Prioritätenschwerpunkte bei den gleichen Kriterien. So gilt die Distanz zu den Wasserquellen nicht mehr als wichtigster Faktor. Viel wichtiger sind zum einen ein maximal ebenes Gelände und zum anderen Licht zur direkten Stromversorgung. Da diese Arbeit insbesondere die Übertragbarkeit untersucht, wird zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Analyseergebnisse die transponierte AHP-Matrix des Basisbaus für die Gewichtung der Landungsoberflächen verwendet. In gewisser Weise stellt die Suche nach einem idealen Basispotenzialgebiet die gegenteilige Perspektive dar. Tabelle 6 zeigt die Bewertung der Kriterien zueinander inklusive der zugehörigen Spaltensummen.

Tabelle 6 Bewertung der relativen Wichtigkeiten der für die Landung relevanten Kriterien

rel. Wichtigkeit	Distanz zu Wasser	Licht	Neigung
Distanz zu Wasser	1,00	0,33	0,20
Licht	3,00	1,00	0,33
Neigung	5,00	3,00	1,00
Summe Spalten:	9,00	4,33	1,53

Tabelle 7 zeigt die mithilfe der Spaltensummen normalisierten relativen Wichtigkeiten der Kriterien zueinander.

Tabelle 7 Normalisierte relative Wichtigkeiten der für die Landung relevanten Kriterien

rel. Wichtigkeit (norm.)	Distanz zu Wasser	Licht	Neigung
Distanz zu Wasser	0,11	0,08	0,13
Licht	0,33	0,23	0,22
Neigung	0,56	0,69	0,65
Summe Spalten:	1,00	1,00	1,00

Tabelle 8 zeigt die berechneten Gewichte, welche die Summen der Zeilen dividiert durch die Anzahl der Kriterien darstellen.

Tabelle 8 Finale Gewichte der für die Landung relevanten Kriterien

Gewichte Kriterien	Distanz zu Wasser	Licht	Neigung	Summe Zeilen	Gewicht
Distanz zu Wasser	0,11	0,08	0,13	0,32	0,11
Licht	0,33	0,23	0,22	0,78	0,26
Neigung	0,56	0,69	0,65	1,90	0,63
Summe Spalten:	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00

2.5.2 Anpassung der Auflösung (Resampling)

Damit die Oberflächen kombiniert werden können, ist es notwendig, dass diese die gleiche Auflösung aufweisen. Dabei richtet sich dieser Anpassungsprozess nach der geringsten Auflösung. Die Oberflächen der Beleuchtungsanalysen sowie die der Wasserdistanzkarte haben eine Auflösung von 100 m/px, das Neigungsraaster eine von 5 m/px. Die Auflösung des Neigungsrasters wird deshalb jeweils auf 100 m/px angepasst. Dabei wird der Datentyp beibehalten. Die Upscalingmethode ist der Mittelwert gewichtet nach Rasterzellenfläche.

2.5.3 Kombination mit der Restriktionsoberfläche

Für den Fall der Landungspotenzialkarten bzw. für die Hybridkarten werden die Faktoroberflächen nun mit der jeweiligen zum Pol gehörigen Restriktionsoberfläche multipliziert. Dadurch werden all diejenigen Bereiche, die aufgrund zu starker Neigung für die Landung nicht in Frage kommen, aus den Oberflächen ausmaskiert. Abbildung 13 zeigt die ausmaskierten Bereiche auf der Wasserdistanzoberfläche.

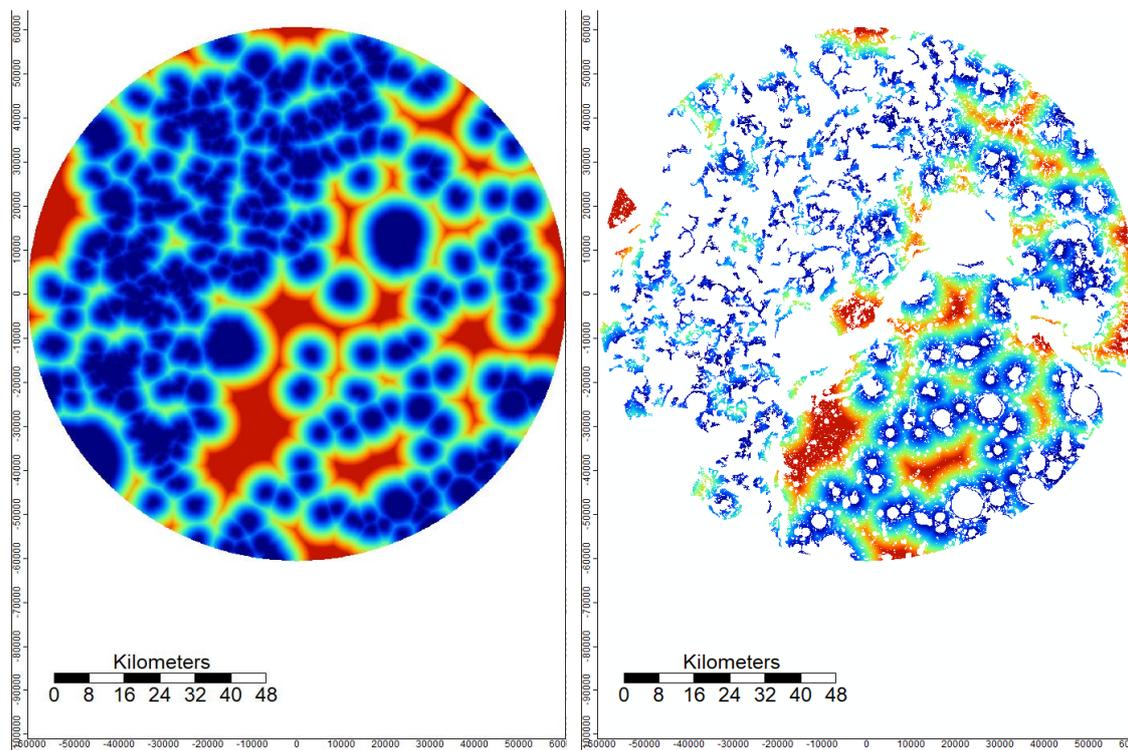


Abbildung 13 Wasserdistanzoberfläche vor (links) und nach der Kombination mit der Restriktionsoberfläche (rechts)

2.5.4 Normalisierung

Nachdem die Oberflächen dieselbe Ausdehnung und Auflösung aufweisen, werden die Zellwerte normalisiert. Formel 2 wird für die Faktoren, die möglichst stark ausgeprägt sein sollen, verwendet. Für Faktoren, die möglichst niedrig sein sollen, wie die Steigung des Geländes oder die Distanz zu Wasserquellen, wird Formel 3 verwendet. Das Normalisierungsvorgehen orientiert sich an dem bereits 1991 von Carver beschriebenen Ablauf. Für Faktoren, die möglichst gering sein sollen, wird Formel 3 angepasst, die Logik ist jedoch deckungsgleich wie bei Carver (1991).

$$x_{norm} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2)$$

$$x_{norm} = 1 - \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3)$$

x_i bildet den Wert der jeweiligen Rasterzelle ab. x_{min} steht für den minimalen Wert der gesamten Faktoroberfläche, x_{max} für den maximalen. x_{norm} stellt den normalisierten Rasterwert dar. Nach Normalisierung der Oberfläche nimmt der Maximalwert als Idealwert den Wert 1 an. Vice versa gilt der Wert 0 als am schlechtesten geeignet. Alle anderen Zellen bewegen sich im Bereich dazwischen.

2.5.5 Gewichtung der Faktoroberflächen

Die Gewichtung der Oberflächen kann nach Ermittlung der spezifischen Gewichte erreicht werden, indem alle Rasterzellen einer Oberfläche mit ihrem zugehörigen Gewicht multipliziert werden. Für die Potenzialkarten für den Basisbau wird die Wasserdistanzoberfläche mit dem Gewicht 0,63, die Lichtoberfläche mit dem Gewicht 0,26 und die Neigungskarte mit dem Gewicht 0,11 multipliziert. Für die Potenzialkarten für den Landungspotenzialgebiete wird die Wasserdistanzoberfläche mit dem Gewicht 0,11, die Lichtoberfläche mit dem Gewicht 0,26 und die Neigungskarte mit dem Gewicht 0,63 multipliziert.

2.5.6 Kombination der Faktoroberflächen

Für diesen Schritt werden alle Rasterzellenwerte der Oberflächen addiert. Es resultiert eine Ergebnisoberfläche.

2.5.7 Pfad- und Korridoranalyse

Abbildungen 14 bis 17 zeigen die ausgewählten exemplarischen Landungs- und Siedlungsgebiete auf dem Nord- und Südpol. Der Landepunkt wird blau und der Siedlungspunkt grün dargestellt.

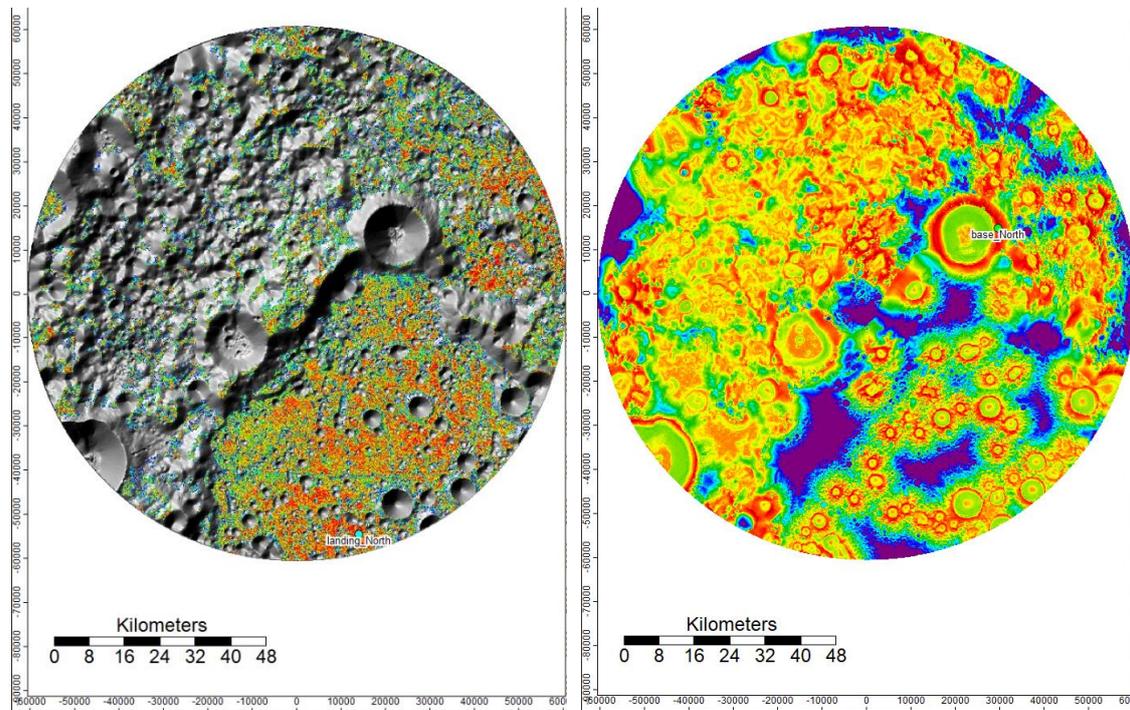


Abbildung 14 Exemplarischer Landungspunkt (links, blau) und Siedlungspunkt (rechts, grün) auf der Potenzialregionenkarte des Nordpols

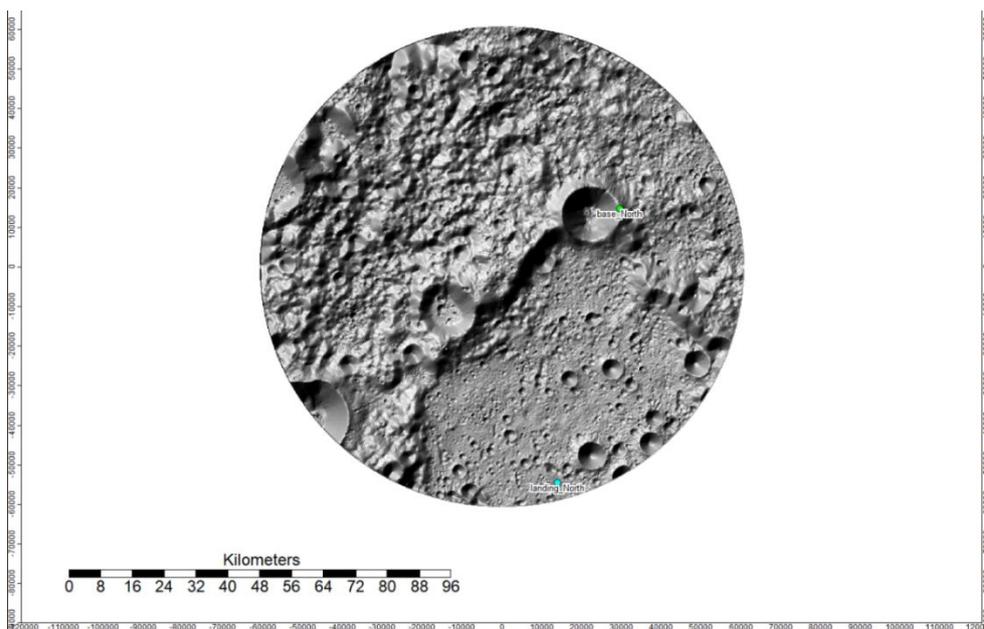


Abbildung 15 Exemplarischer Landungs- und Siedlungspunkt auf einer Hillshadedarstellung des Nordpols

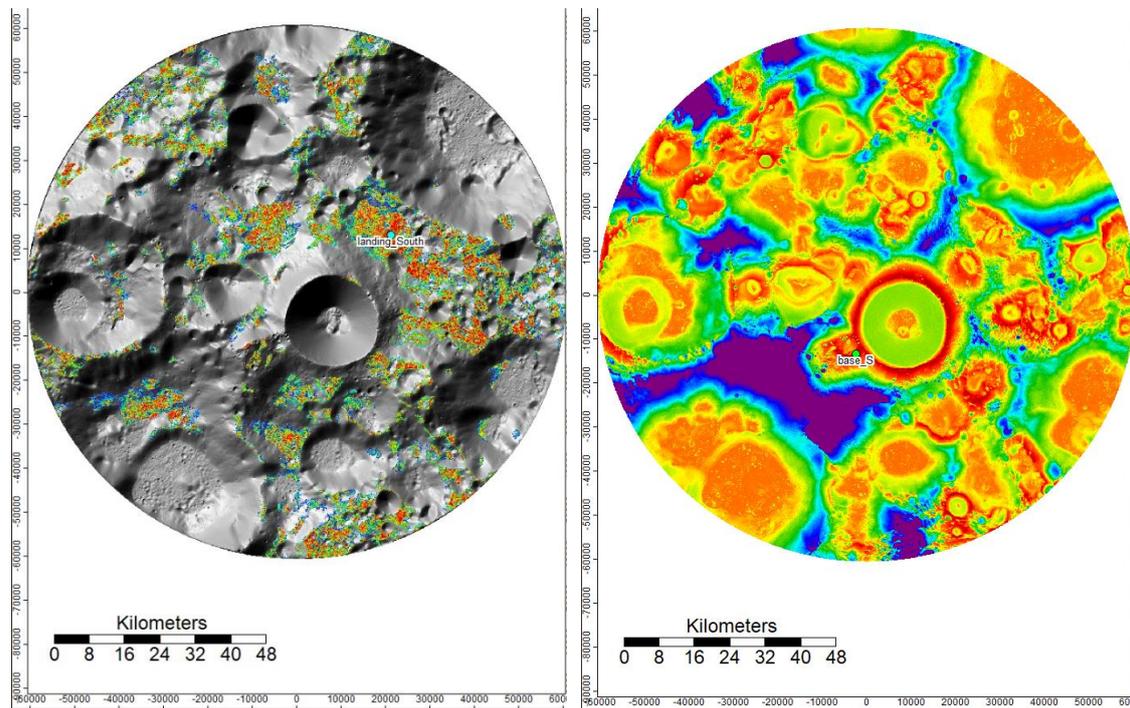


Abbildung 16 Exemplarischer Landungspunkt (links, blau) und Siedlungspunkt (rechts, grün) auf der Potenzialregionenkarte des Südpols

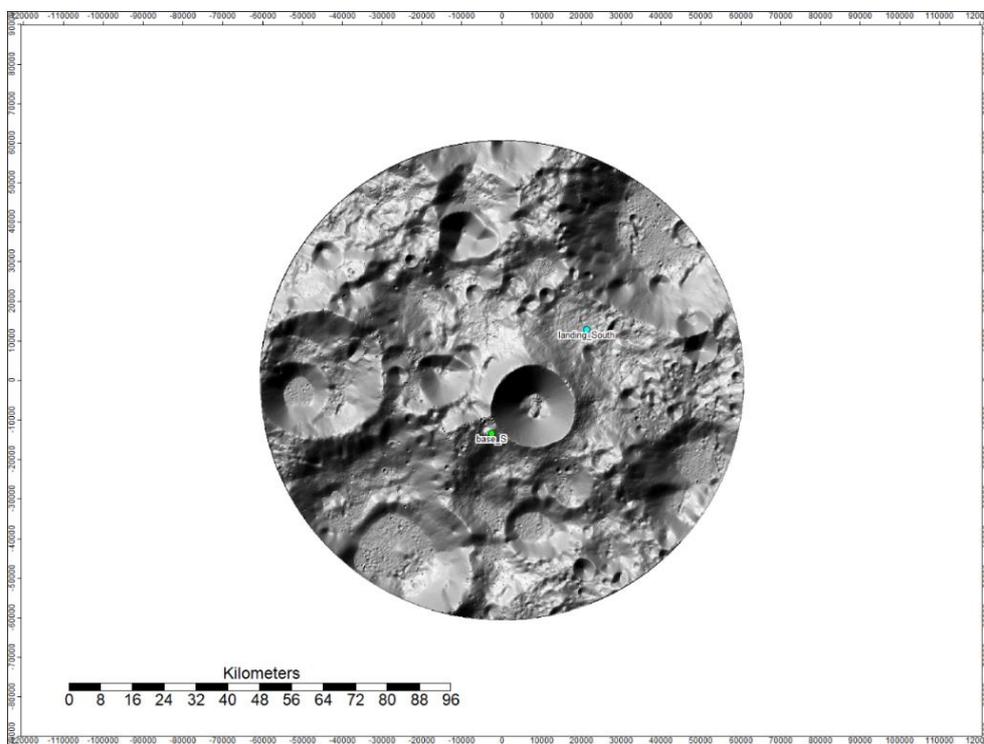


Abbildung 17 Exemplarischer Landungs- und Siedlungspunkt auf einer Hillshadedarstellung des Südpols

Die geglättete Neigungsoberfläche wird zunächst auf eine Rasterzellengröße von 100 m/px angepasst. Dabei soll der Datentyp erhalten bleiben. Als Upscalingmethode wird, wie bei der WLC der Zellmittelwert gewichtet nach Zellfläche gewählt. Anschließend wird durch einen Reklassifizierungsschritt allen Zellen, die einen höheren Steigungswert als 30 ° aufweisen, ein unrealistisch hoher Wert (99999) gegeben, damit diese Bereiche durch den enorm hohen Kostenfaktor in der Pfadanalyse nicht berücksichtigt werden. Anschließend wird eine akkumulierte Kostenoberfläche ausgehend vom geplanten Basisstandort auf Grundlage des Neigungsdatensatzes berechnet. Zuletzt können diese Oberfläche und der Landungspunkt dazu genutzt werden, den kostengünstigsten Pfad von Landeplatz zu Siedlungsgebiet zu berechnen. Für die Korridoranalyse wird nun eine weitere akkumulierte Kostenoberfläche berechnet, diesmal vom Landeplatz ausgehend. Als nächstes werden die akkumulierten Kostenoberflächen addiert. Die des Nordpols weist ein Minimum von 6054,41 auf. Um einen Korridor mit allen Routen zu erhalten, die maximal 10 % teurer sind, muss die Oberfläche reklassifiziert werden. Alle Zellen, die einen größeren Zellwert als 6659,85 aufweisen, erhalten den NoData Wert. Im Falle des Südpols liegt das Minimum bei 6527,35, also wird die Oberfläche mit einem Schwellwert von 7180,09 reklassifiziert. Zuletzt werden die Korridore mithilfe der Formel 2 zwischen Werten von 0 und 1 reskaliert.

3. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zunächst die Resultate der Analyse in Form von Abbildungen und mithilfe ihrer wichtigsten statistischen Kennzahlen aufgelistet. Anschließend folgt deren Interpretation und Kontextualisierung in gebündelter Form.

3.1 Potenzialregionen für Landung und Basisbau auf dem Nordpol

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisoberfläche der Potenzialregionen für den Basisbau am Nordpol des Mondes. Die Rasterzellengröße beträgt 100 m/px. Der Eignungswert, der die Eignung der Bereiche wiedergibt, ist dimensionslos. Die Bereiche sind umso besser geeignet, je höher der Eignungswert der Region ist. Tabelle 9 listet die wichtigsten statistischen Werte des Datensatzes auf. Dabei kann die Anzahl der wertetragenden Rasterzellen als Fläche in ha interpretiert werden.

Tabelle 9 Statistische Kennwerte der Potenzialregionen für den Basisbau auf dem Nordpol

Gesamtzahl Rasterzellen	1473796
Gesamtzahl NoData Rasterzellen	318080
Gesamtzahl wertetragender Rasterzellen	1155716
Minimum Score	0,10
Maximum Score	0,92
Spannweite	0,82
Arithmetisches Mittel	0,65
Standardabweichung	0,09

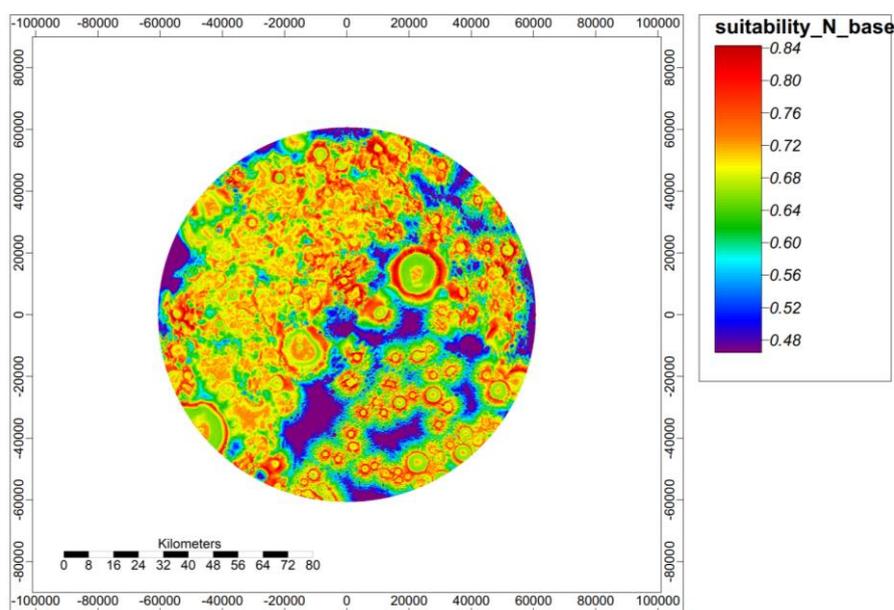


Abbildung 18 Potenzialregionen für den Basisbau am Nordpol

Abbildung 19 zeigt die Ergebnisoberfläche der Potenzialregionen für die Landung am Nordpol des Mondes. Die Rasterzellengröße beträgt 100 m/px. Der Eignungswert, der die Eignung der Bereiche wiedergibt, ist dimensionslos. Die Bereiche sind umso besser geeignet, je höher der Eignungswert der Region ist. Tabelle 10 listet die wichtigsten statistischen Werte des Datensatzes auf. Dabei kann die Anzahl der werttragenden Rasterzellen als Fläche in ha interpretiert werden.

Tabelle 10 Statistische Kennwerte der Potenzialregionen für die Landung auf dem Nordpol

Gesamtzahl Rasterzellen	1473796
Gesamtzahl NoData Rasterzellen	1041499
Gesamtzahl werttragender Rasterzellen	432297
Minimum Score	0,03
Maximum Score	0,82
Spannweite	0,79
Arithmetisches Mittel	0,40
Standardabweichung	0,13

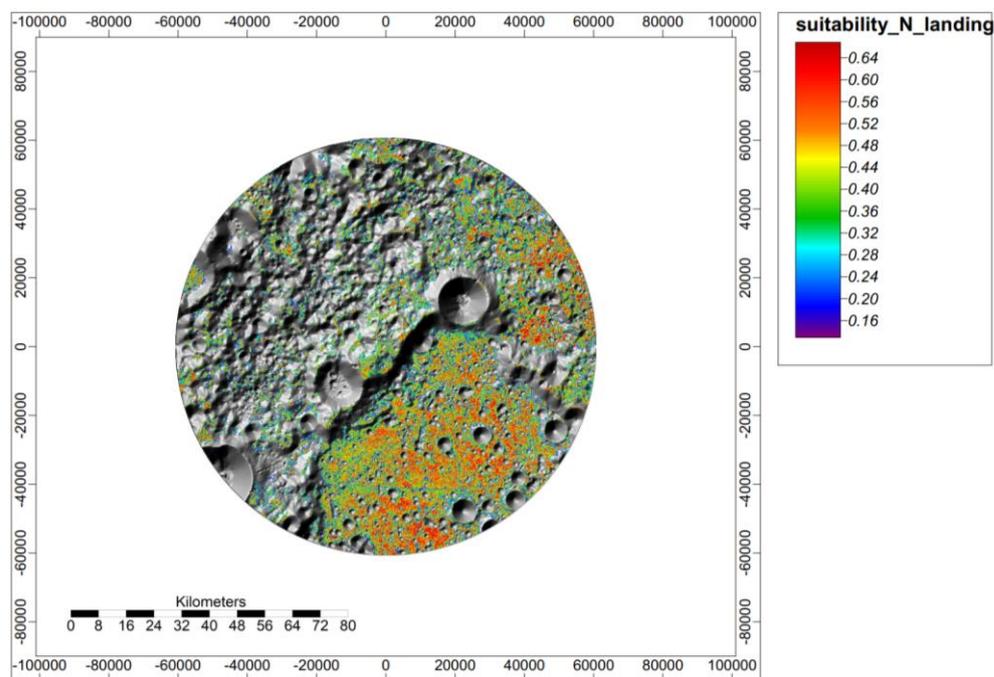


Abbildung 19 Potenzialregionen für die Landung am Nordpol

3.2 Hybridkarte aus den Potenzialregionen für Landung und Basisbau auf dem Nordpol

Abbildung 20 zeigt die hybride Ergebnisoberfläche der Potenzialregionen für Basisbau und Landung am Nordpol des Mondes. Basisbau und Landung wurden gleichbedeutend gewichtet. Die Rasterzellengröße beträgt 100 m/px. Der Eignungswert, der die Eignung der Bereiche wiedergibt, ist dimensionslos. Die Bereiche sind umso besser geeignet, je höher der Eignungswert der Region ist. Tabelle 11 listet die wichtigsten statistischen Werte des Datensatzes auf. Dabei kann die Anzahl der werttragenden Rasterzellen als Fläche in ha interpretiert werden.

Tabelle 11 Statistische Kennwerte der hybriden Potenzialregionen für den Nordpol

Gesamtzahl Rasterzellen	1473796
Gesamtzahl NoData Rasterzellen	1041499
Gesamtzahl werttragender Rasterzellen	432297
Minimum Score	0,04
Maximum Score	0,82
Spannweite	0,78
Arithmetisches Mittel	0,49
Standardabweichung	0,10

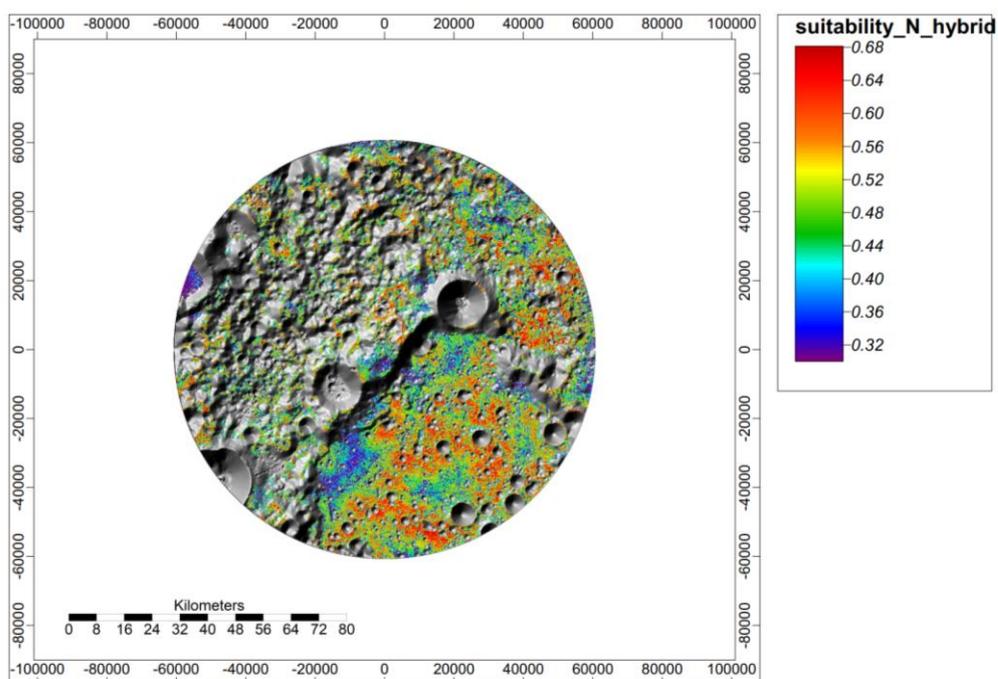


Abbildung 20 Hybridkarte der Potenzialregionen für Basisbau und Landung am Nordpol

3.3 Potenzialregionen für Landung und Basisbau auf dem Südpol

Abbildung 21 zeigt die Ergebnisoberfläche der Potenzialregionen für den Basisbau am Südpol des Mondes. Die Rasterzellengröße beträgt 100 m/px. Der Eignungswert, der die Eignung der Bereiche wiedergibt, ist dimensionslos. Die Bereiche sind umso besser geeignet, je höher der Eignungswert der Region ist. Tabelle 12 listet die wichtigsten statistischen Werte des Datensatzes auf. Dabei kann die Anzahl der wertetragenden Rasterzellen als Fläche in ha interpretiert werden.

Tabelle 12 Statistische Kennwerte der Potenzialregionen für den Basisbau auf dem Südpol

Gesamtzahl Rasterzellen	1473796
Gesamtzahl NoData Rasterzellen	318080
Gesamtzahl wertetragender Rasterzellen	1155716
Minimum Score	0,14
Maximum Score	0,93
Spannweite	0,79
Arithmetisches Mittel	0,64
Standardabweichung	0,10

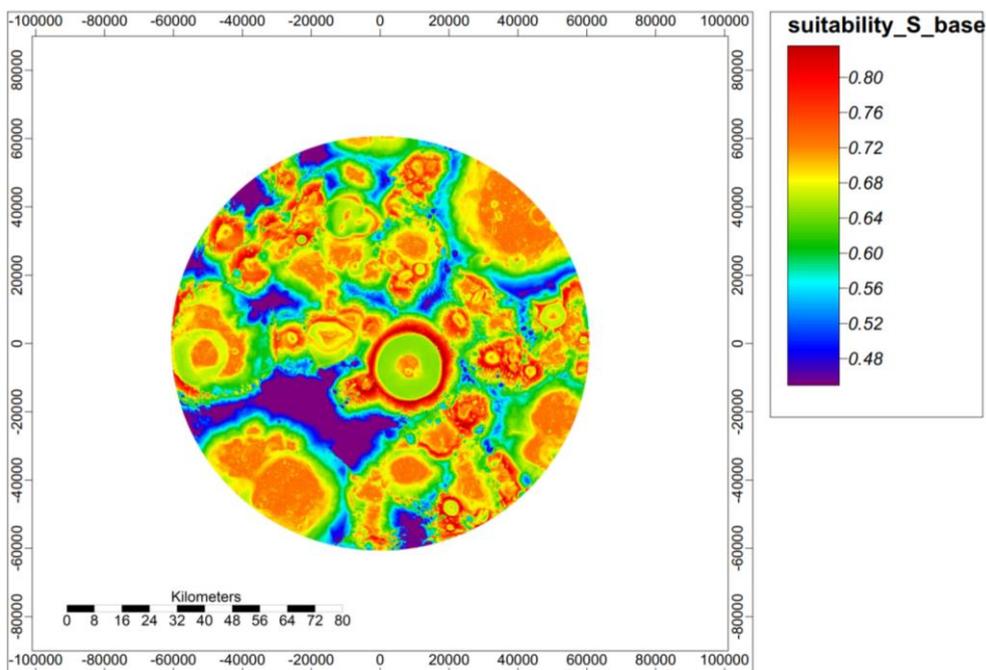


Abbildung 21 Potenzialregionen für den Basisbau am Südpol

Abbildung 22 zeigt die Ergebnisoberfläche der Potenzialregionen für die Landung am Südpol des Mondes. Die Rasterzellengröße beträgt 100 m/px. Der Eignungswert, der die Eignung der Bereiche wiedergibt, ist dimensionslos. Die Bereiche sind umso besser geeignet, je höher der Eignungswert der Region ist. Tabelle 13 listet die wichtigsten statistischen Werte des Datensatzes auf. Dabei kann die Anzahl der werttragenden Rasterzellen als Fläche in ha interpretiert werden.

Tabelle 13 Statistische Kennwerte der Potenzialregionen für die Landung auf dem Südpol

Gesamtzahl Rasterzellen	1473796
Gesamtzahl NoData Rasterzellen	1272605
Gesamtzahl werttragender Rasterzellen	201191
Minimum Score	0,03
Maximum Score	0,84
Spannweite	0,81
Arithmetisches Mittel	0,36
Standardabweichung	0,13

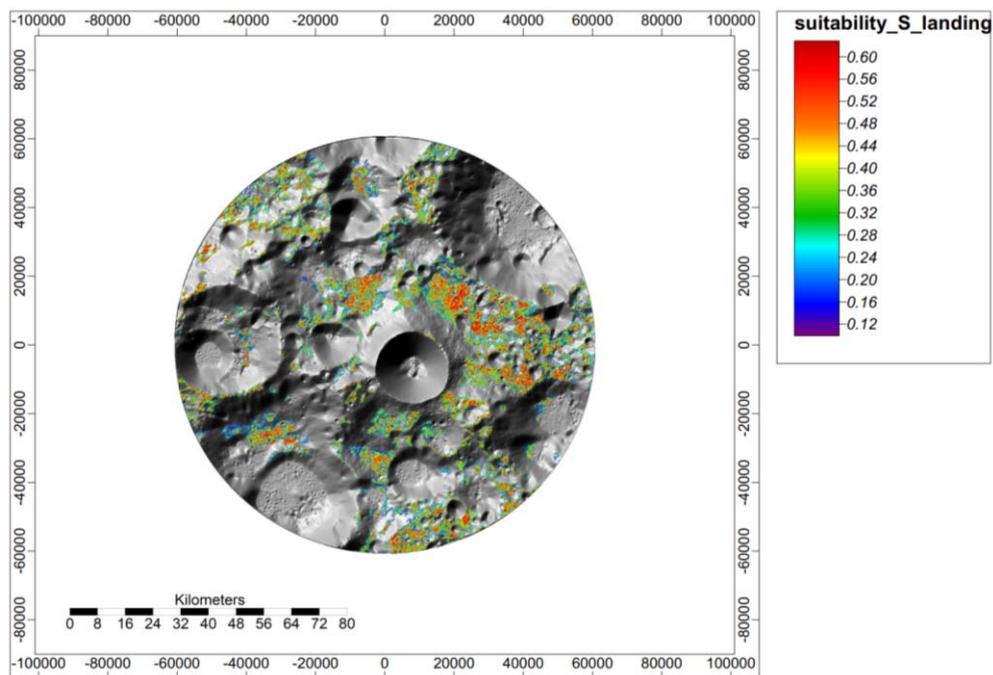


Abbildung 22 Potenzialregionen für die Landung am Südpol

3.4 Hybridkarte aus den Potenzialregionen für Landung und Basisbau auf dem Südpol

Abbildung 23 zeigt die hybride Ergebnisoberfläche der Potenzialregionen für Basisbau und Landung am Südpol des Mondes. Basisbau und Landung wurden gleichbedeutend gewichtet. Die Rasterzellengröße beträgt 100 m/px. Der Eignungswert, der die Eignung der Bereiche wiedergibt, ist dimensionslos. Die Bereiche sind umso besser geeignet, je höher der Eignungswert der Region ist. Tabelle 14 listet die wichtigsten statistischen Werte des Datensatzes auf. Dabei kann die Anzahl der werttragenden Rasterzellen als Fläche in ha interpretiert werden.

Tabelle 14 Statistische Kennwerte der hybriden Potenzialregionen für den Südpol

Gesamtzahl Rasterzellen	1473796
Gesamtzahl NoData Rasterzellen	1272605
Gesamtzahl werttragender Rasterzellen	201191
Minimum Score	0,08
Maximum Score	0,79
Spannweite	0,71
Arithmetisches Mittel	0,46
Standardabweichung	0,10

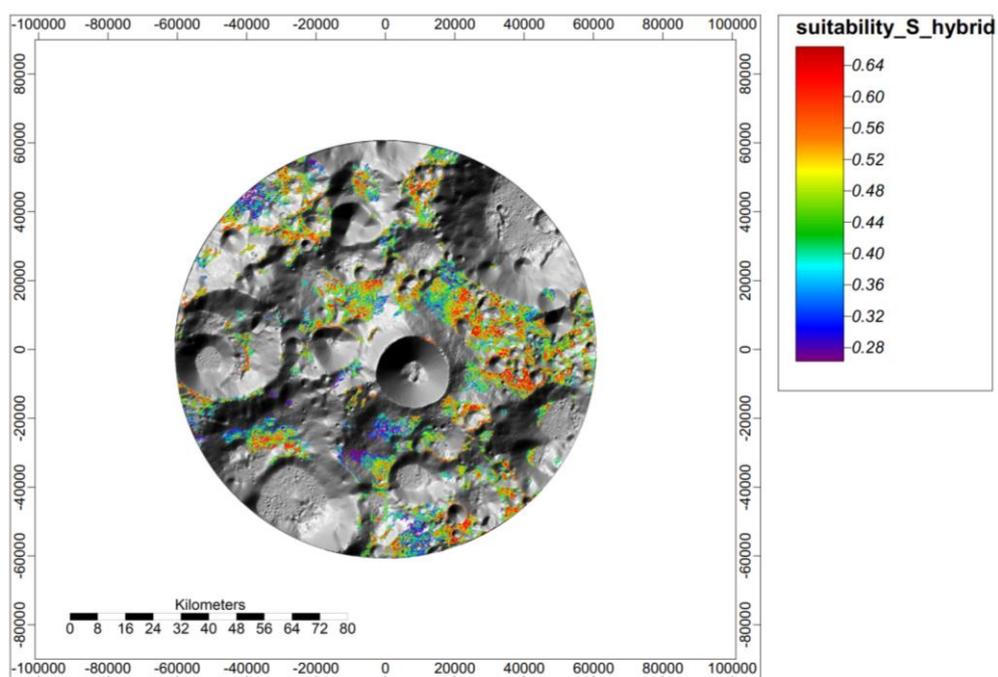


Abbildung 23 Hybridkarte der Potenzialregionen für Basisbau und Landung am Südpol

3.5 Licht und Wasser

Abbildung 24 zeigt die der Beleuchtungsflächen. Die schwarzen Bereiche stehen für die Regionen ewiger Dunkelheit. In dieser Darstellung werden die Verteilung und Dimensionierung der lichtlosen Bereiche ersichtlich. Gleichzeitig sind diese als Potenzialregionen von Wasservorkommen ausgezeichnet. Tabelle 15 listet die Gesamtfläche dieser Regionen für Nord- und Südpol tabellarisch auf.

Tabelle 15 Flächengrößen der Lichtlosen Bereiche am Nord- und Südpol in Hektar

<i>Region</i>	<i>Fläche [ha]</i>
<i>Nordpol</i>	143732
<i>Südpol</i>	277438

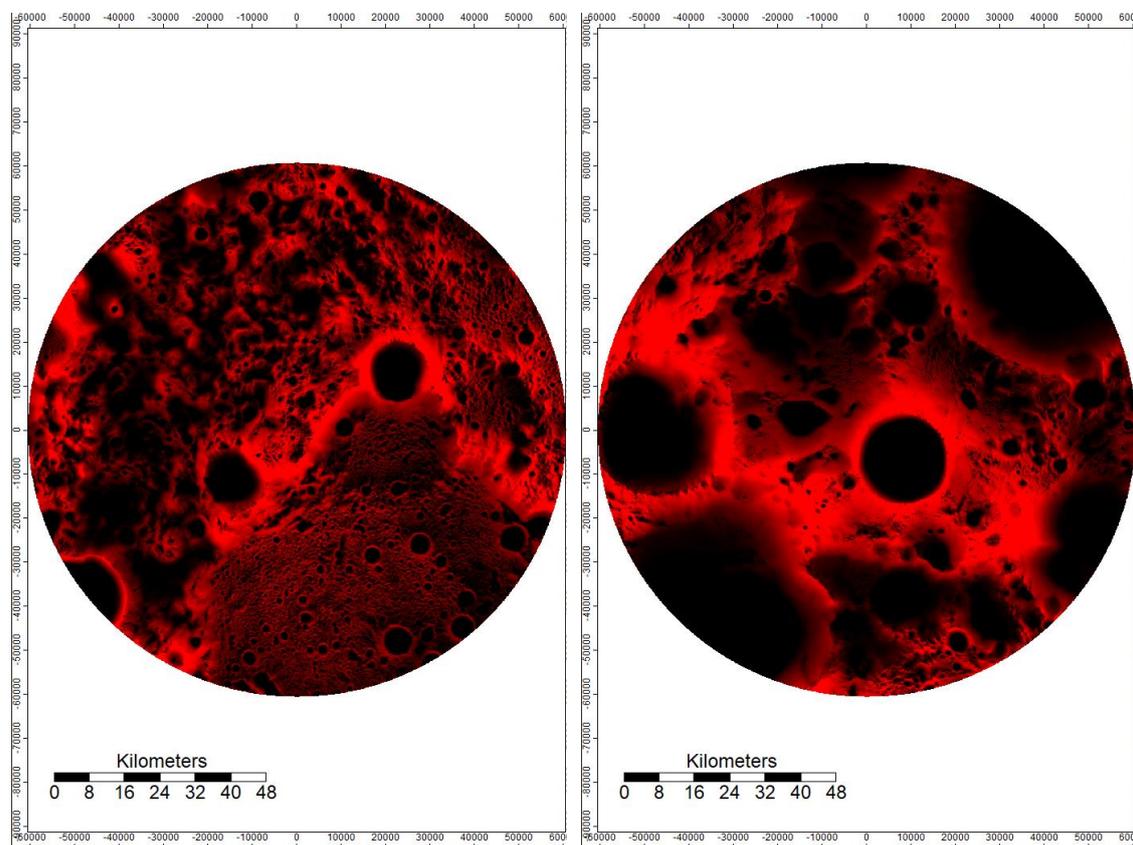


Abbildung 24 Beleuchtungsflächen des Nordpols (links) und des Südpols (rechts)

3.6 Pfad- und Korridoranalyse

Abbildung 25 zeigt den Nordpol mit dem potenziellen Lande- und Bauplatz sowie den günstigsten Weg zwischen beiden Bereichen bezogen auf die Steigung des Geländes. Die Länge des günstigsten Pfades beträgt 95,18 km. Um den günstigsten Pfad zeichnet sich der Korridor ab, der alle Routen enthält, die max. 10 % Mehrkosten bedeuten würden. Tabelle 16 listet die wichtigsten statistischen Werte der Korridoranalyse auf.

Tabelle 16 Statistische Kennwerte für die Korridoranalyse des Nordpols

Gesamtzahl Rasterzellen	1473796
Gesamtzahl NoData Rasterzellen	1309950
Gesamtzahl wertetragender Rasterzellen	163846
Minimum Score	0
Maximum Score	1
Spannweite	1
Arithmetisches Mittel	0,41
Standardabweichung	0,29

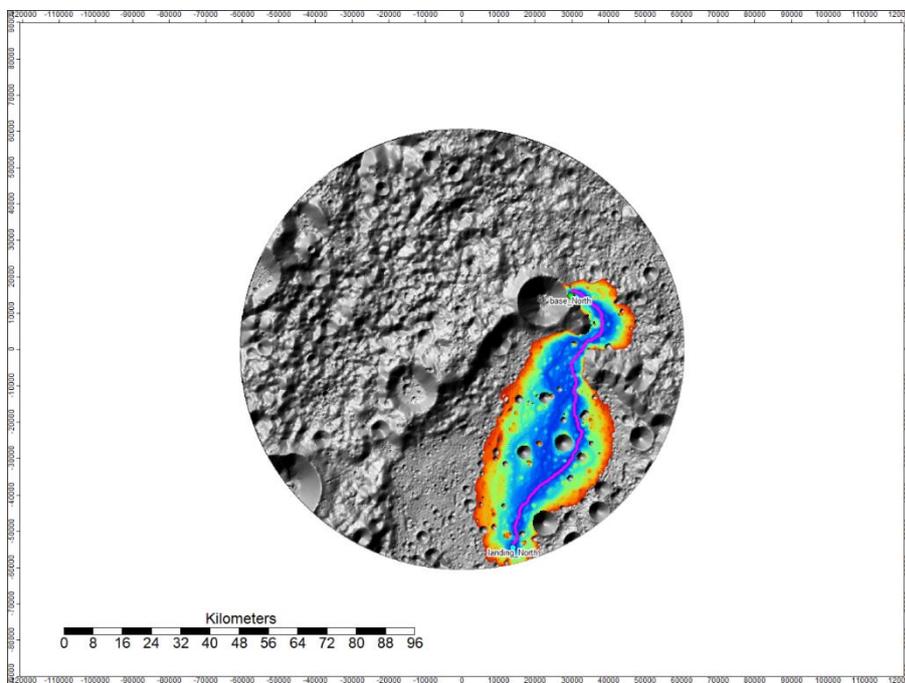


Abbildung 25 Pfad- und Korridoranalyse für das exemplarische Lande- und Basisbaugelände am Nordpol

Abbildung 26 zeigt den Südpol mit dem potenziellen Lande- und Bauplatz sowie den günstigsten Weg zwischen beiden Bereichen bezogen auf die Steigung des Geländes. Die Länge des günstigsten Pfades beträgt 58,26 km. Um den günstigsten Pfad zeichnet sich der Korridor ab, der alle Routen enthält, die max. 10 % Mehrkosten bedeuten würden. Tabelle 17 listet die wichtigsten statistischen Werte der Korridoranalyse auf.

Tabelle 17 Statistische Kennwerte für die Korridoranalyse des Südpols

Gesamtzahl Rasterzellen	1473796
Gesamtzahl NoData Rasterzellen	1388159
Gesamtzahl wertetragender Rasterzellen	85637
Minimum Score	0
Maximum Score	1
Spannweite	1
Arithmetisches Mittel	0,52
Standardabweichung	0,28

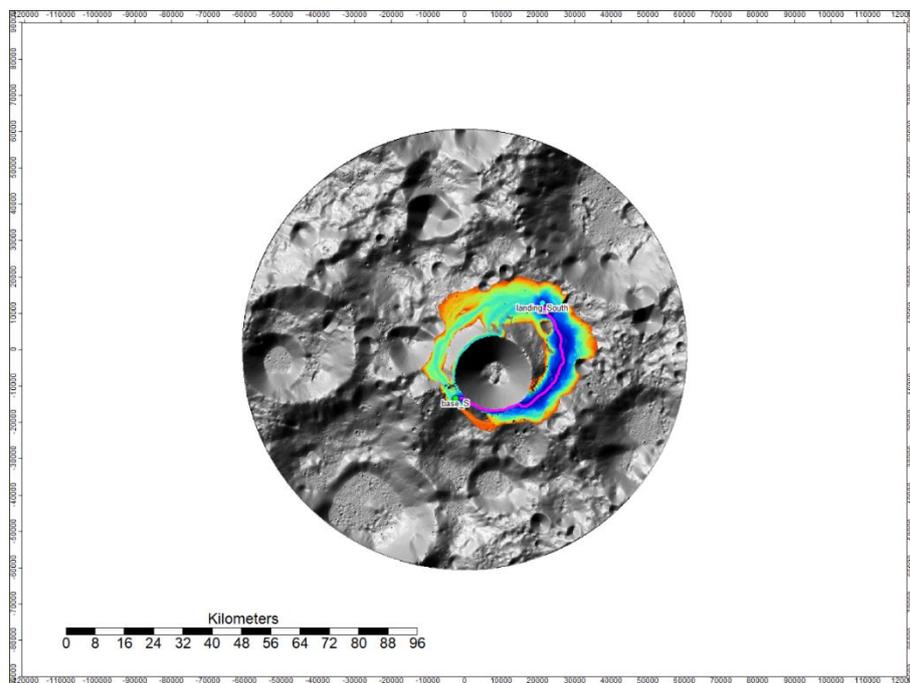


Abbildung 26 Pfad- und Korridoranalyse für das exemplarische Lande- und Basisbaugelände am Südpol

3.7 Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen bereits umfangreiche Interpretationen zu. So unterscheiden sich die Potenzialkarten der Pole hinsichtlich Landung und Siedlung stark (vgl. Abbildung 18, 19, 21 und 22). Prinzipiell scheint das Bauen günstiger zu sein als das Landen. Für das Landemanöver kamen große Bereiche der Pole nicht in Frage, da sie entweder in Kratern oder an zu steilen Hängen lagen. Dies wird beim Vergleich mit der Restriktionskarte ersichtlich (vgl. Abbildung 5). Die Landungsoperation kann als kritischer als der Basisbau betrachtet werden. Die Geländemorphologie der Pole scheint dafür nicht ideal. Vergleicht man die Pole miteinander, fällt auf, dass der Nordpol eine komplexere, kleinteiligere Oberflächenstruktur aufweist (vgl. Abbildung 15 und 17). Der Südpol hingegen wird von großen Einschlagskratern dominiert. Insgesamt wirkt der Südpol homogener in seiner Oberflächenmorphologie. Dennoch scheint es, als seien mehr Landungsmöglichkeiten auf dem Nordpol vorhanden als am Südpol (vgl. Abbildung 19 und 22). Bei Betrachtung der Siedlungskarten zeichnet sich der Nordpol durch eine ebenfalls stärkere Heterogenität aus (vgl. Abbildung 18 und 21). Für beide Pole gilt das Prinzip, dass Siedlungsstandorte an den Kraterrändern besonders geeignet zu sein scheinen. Dies erscheint plausibel, da sie nah an einer Wassereisquelle liegen und sich dabei auf flachem Untergrund befinden. Gleichzeitig liegen diese Standorte in großer Höhe und damit außerhalb der ewig dunklen Bereiche. Der starke Unterschied hinsichtlich der Eignung von Landung und Basisbau verringert die Aussagekraft der Hybridkarten und legt einen Zweiphasenplan nahe (vgl. Abbildung 20 und 23). Zunächst sollte ein ideales Landungsgebiet identifiziert werden. Die Landung stellt einen der kritischsten Momente der gesamten Operation dar und ihre Risiken sollten deshalb durch die Wahl eines idealen Landeplatzes so weit möglich reduziert werden. Von diesem ausgehend könnte die Strecke zum Siedlungspunkt mithilfe von Fahrzeugen zurückgelegt werden. Durch Pfad- und Korridoranalysen können die Ergebnisse für Landung und Siedlung verbunden werden (vgl. Abbildung 25 und 26). Der Korridor stellt in gewisser Weise eine umgekehrte Eignungsfläche dar. Hier ist das Ziel, die geringsten Kostenfaktorbereiche abzubilden. Die technischen Möglichkeiten des Landungsfahrzeugs determinieren dieses Vorgehen. So sind Fahrzeugspezifikationen wie Steigfähigkeit und Reichweite Faktoren, die nicht beliebig angepasst werden können und vom derzeitigen Stand der Technik abhängen. Anpassungsfähigkeit und Flexibilität liegen somit auf Seiten der Analyse. Sind die Möglichkeiten der Fahrzeuge bekannt, kann leicht eine Vielzahl an Szenarien durchgerechnet

werden. Wie bereits beschrieben, zeigt der Südpol eine insgesamt stärkere Homogenität. Es gibt sehr große zusammenhängende Flächen, die Wassereis beherbergen könnten. Auch die durch Sonnenlicht energieverstärkten Bereiche sind zahlreich und groß (vgl. Tabelle 15 und Abbildung 24). Da Eis ein determinierender und äußerst wichtiger Erfolgsfaktor ist und die Möglichkeit von *in situ* Produktionsketten für wichtige Ressourcen bietet, scheint der Südpol die geeignetere Variante für ein Kolonisierungsvorhaben zu sein (Mazzetti et al., 2019; Meurisse et al., 2018). Der Kraterrand des Shakleton Kraters bietet einen guten Siedlungsstandort (vgl. Abbildung 17, 21 und 26). Als Landefeld eignet sich die vergleichsweise flache Ebene neben dem Krater. Die aufgesetzte Korridoranalyse ermöglicht es, neben dem idealen Pfad auch Alternativrouten zu identifizieren, um die Planung flexibler zu machen. In Abbildung 26 führt der ideale Pfad entlang des Kraterrandes, was ein Risiko darstellen kann. Die Alternativrouten sind mit Blick auf den Kostenfaktor zwar teurer, jedoch unter Umständen sicherer. Mittels Korridoranalysen können zusätzlich Engstellen identifiziert werden (Pinto and Keitt, 2009). In Abbildung 25 ist kurz vor der Basis am Kraterrand eine solche Engstelle gut zu erkennen. Solche Nadelöhre wirken sich möglicherweise kritisch auf das Gelingen der Mission aus. Durch Kenntnis dieser Bereiche können entsprechende Vorbereitungen getroffen werden.

4. Diskussion

Dieser Abschnitt behandelt das Forschungsteilziel (6) Bewertung der Analyseergebnisse. Die Bedeutung, Ressourcen vor Ort zu nutzen, wird von Mazzetti et al. (2019) und Meurisse et al. (2018) besonders hervorgehoben. Diese *in situ* Produktionsketten tragen zu einer Risiko- und Kostenminderung von Mondmissionen bei. WLC Analysen können durch eine angepasste Parametrisierung unterschiedliche Kriterien berücksichtigen und so bei der Auswahl ressourcensynergetisch optimaler Bereiche helfen. In diesem Zusammenhang betonen Colwell et al. (2007) und Meurisse et al. (2018) die Bedeutung der Mondoberfläche als Ressourcenquelle für verschiedene Anwendungszwecke, insbesondere für die Produktion von Baustoffen. Genauso könnten zahlreiche weitere Kriterien, die beispielsweise Wörner (2019) auflistet, als Faktor- wie Restriktionsoberflächen berücksichtigt werden. Die Kriterien müssen nicht direkt als Datensatz vorliegen. Es ist auch möglich, Kriterien aus Messungen zu abstrahieren, wie es in diesem Fall durch die Verwendung der Beleuchtungsanalysen getan wurde, um Rückschlüsse auf mögliche Wasservorkommen zu ziehen. Dabei muss festgelegt werden, ob der Faktor möglichst hoch oder niedrig sein soll. Dies hängt von der Perspektive der PlanerInnen ab, für die die Analyse durchgeführt wird. Beispielsweise können stark ausgeprägte Windverhältnisse gut für die Energieproduktion durch Windkraft sein. Sie können jedoch auch ein Risiko für Bauteile oder Solarzellen sein (Staubbedeckung). Jeder Faktor bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten, ihn in die Analyse einfließen zu lassen. Die Geländeneigung spielt für Bauvorhaben und Landung eine Rolle, wie es Djachkova et al. (2017) beschreibt. So sollte ein Landeplatz nach Möglichkeit nicht mehr als 7° Neigung aufweisen (Djachkova et al., 2017). Die Neigung kann aber auch für Pfad- und Korridoranalysen als Kostenfaktor dienen. Mateo Sanguino (2017) beschreibt die maximale Steigfähigkeit verschiedener Rover, die durch die Technik oder andere Anforderungen an die Fahrzeuge determiniert sein kann. In der Pfadanalyse konnte beispielsweise die Neigung als Kostenfaktor und Restriktion gleichermaßen berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Analysen lassen viele weitere Möglichkeiten der Interpretation zu. Diese hängt immer von der Perspektive und Zielstellung der PlanerInnen ab. Könnte durch einen geeigneten Landeplatz Personal und Material sicher auf den Mond verbracht werden, wäre es dem Menschen möglich am Südpol einen ersten Brückenkopf zu etablieren, von dem aus weitere Unterfangen geplant oder unterstützt werden könnten. Standortbewertungsverfahren können wichtige Impulse

für die Planung geben und Alternativen aufzeigen. Dies wird über ein objektives und transparentes Verfahren erreicht. Dadurch tragen sie möglicherweise zu Planungsleichterungen für Kolonisierungsmissionen bei. Weltraummissionen zeichnen sich naturgemäß durch einen enormen Planungsaufwand aus, da Folgeversuche sehr teuer sind und bei bemannten Missionen nicht in Kauf genommen werden können. Somit muss die Mission so gut wie möglich vorbereitet werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen, welche Bedeutung Standortbewertungsverfahren in der Planung von Weltraummissionen einnehmen können. Der Fachbereich der Geoinformatik kann als Entrepreneur für verschiedene Fachdomänen dienen und unterstützt dabei die Erarbeitung objektiv nachvollziehbarer Ergebnisse. Dadurch erleichtert die Geoinformatik die Konsensfindung innerhalb einer Interessensgemeinschaft und ermöglicht es somit, insbesondere bei großen, komplexen Unternehmungen, die Transparenz der Entscheidung zu wahren. Die Verwendung dieser oder ähnlicher Verfahren ist für diesen Zweck naheliegend, so wenden auch Djachkova et al. (2017) eine verwandte Logik an, das boolean overlay. Durch die Unterstützung von ExpertInnen aus der Geoinformatik könnten auch komplexere Verfahren sicher angewandt werden und es ermöglichen, dass die Forschenden sich auf ihre spezifischen Fachbereiche fokussieren können. Zuletzt können diese Ergebnisse in einem gemeinschaftlichen Prozess kombiniert werden. Die Wahl der Standorte in dieser Arbeit ist exemplarischer Natur. Dies zeigt den hohen Flexibilitätsgrad von Standortbewertungsverfahren, der unabhängig von Ort und Kriterienkombination vorliegt. Die Anpassung von Gewichten und Schwellenwerten stellt einen geringen Aufwand dar. Der Löwenanteil liegt in der Datenbeschaffung und -aufbereitung. Als Ergebnis wird eine Zusammenstellung der Regionen übergeben, die die bestimmten Faktoren in optimaler und weniger optimaler Weise abdecken. Damit stellen die Ergebnisse eine Diskussionsgrundlage dar, die alle sinnvollen Alternativen dieser speziellen Parameterkonfiguration enthält. In dieser Arbeit sollte bewertet werden, ob etablierte Standortbewertungsverfahren, wie die WLC, auf extraterrestrische Standorte wie den Mond übertragen werden können, um einen idealen Startpunkt für Kolonisierungsunternehmungen zu identifizieren. Es wurde definiert, dass die Analyse als erfolgreich durchgeführt gilt, wenn die Anwendung der Analyselogik auf die Datengrundlage Ergebnisoberflächen erzeugt, die nachvollziehbare, mögliche Siedlungsstandorte eines extraterrestrischen Untersuchungsgebietes liefern. Nach dieser Definition konnte das Ziel vollständig erreicht werden. Um die tatsächliche Übertragbarkeit zu bewerten, müsste eine Mondmission geplant und mit Unterstützung

einer Standortbewertungsanalyse durchgeführt werden. Anschließend müsste nach Etablierung der Mondsiedlung bewertet werden, ob das Vorgehen tatsächlich den Planungsprozess signifikant unterstützt hat. Dieser Aufwand wäre nicht verhältnismäßig, weshalb die Belastbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit hinsichtlich der Übertragbarkeit als überzeugend gelten kann. Neben der reinen Übertragbarkeit zeigte sich, dass das Vorgehen einen weiteren Vorteil hat. Es bietet die Möglichkeit, verschiedene Disziplinen auf transparente Art und Weise zu unterstützen und zusammenzuführen.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war, Gebiete an den Polen des Erdmondes zu identifizieren, die eine möglichst günstige Kombination bestimmter Kriterien bieten. Dazu wurden Daten der Kriterien entweder direkt verwendet (Beleuchtungsflächen) oder aber indirekt, indem sie aus anderen Daten abgeleitet wurden (Wasserpotenzialregionen, Neigungsfläche). Mithilfe dieser Daten wurde eine WLC durchgeführt, wobei die relativen Wichtigkeiten der Faktoren durch den AHP bestimmt wurden. Auch wurden exemplarische Siedlungs- und Landepunkte gewählt, um diese durch eine Pfad- und Korridoranalyse mit der Geländeneigung als Kostenfaktor zu verbinden. Die Pole sind tendenziell besser für Siedlungsvorhaben geeignet als für Landungen. Dies ist auf die Geländemorphologie zurückzuführen. Für Siedlungszwecke zeichnen sich vor allem die Ränder großer Krater aus. Dies begründet sich in der Nähe zu möglichen Wassereisvorkommen, die als wichtigste Ressourcenquelle dienen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde als gegeben erachtet, wenn die Anwendung der Analyselogik auf die Datengrundlage eine Ergebnisoberfläche erzeugt, die nachvollziehbare, mögliche Landungs- und Siedlungsstandorte eines extraterrestrischen Untersuchungsgebietes liefert. Dies konnte bestätigt werden. In dieser Arbeit wurden drei Faktoren berücksichtigt. Die Geländeneigung, welche aus einem Geländemodell berechnet wurde. Beleuchtungsverhältnisse, welche aus bereits durchgeführten Analysen bezogen wurden. Und die Möglichkeit von Wassereisvorkommen, welche ebenfalls aus der Beleuchtungsanalyse abgeleitet wurden. Die Einbindung solcher Analysen bieten neben Planungserleichterungen den Vorteil, eine interdisziplinäre Entscheidungsfindung durch objektive, transparente Ergebnisse zu fördern. Dies ist gleichzeitig eine Herausforderung und eine Partizipationsmöglichkeit der Geoinformatik. Wie Malczewski (2000) in seiner Beschreibung von common und best practice Anwendungen am Beispiel der WLC beschreibt, ist ein großes Problem der Verfahren, dass sie sehr simpel wirken und deshalb häufig fehlerhaft angewendet werden. Durch die Beteiligung ausgebildeter GeoinformatikerInnen kann dieses Risiko ausgeschlossen werden. Eine interessante Anpassung des Vorgehens wäre es, zusätzlich zu der paarweisen Bestimmung der relativen Wichtigkeit jedes einzelnen Faktors auch das gleichzeitige räumliche Auftreten mit zugehöriger Intensität der Faktoren zu berücksichtigen. Möglicherweise verhalten sich bestimmte Faktorkombinationen mit bestimmter Intensität emergent. Diese Emergenz kann nur aus der ergänzten räumlichen Perspektive direkt berücksichtigt

werden. Eine räumlich emergente Faktorkombination könnte Idealgebiete möglicherweise schärfer abgrenzen. Die Analyse könnte außerdem an vielen weiteren Stellen modifiziert werden. Möglich wäre die Berücksichtigung der Zusammensetzung des Oberflächenmaterials oder eine Optimierung der Pfad- und Korridoranalysen durch Distanzrestriktionen oder auch die Berücksichtigung weiterer Faktoren. Dabei böte sich an, verschiedene Fachdomänen direkt in die Analyse mit einzubeziehen. Die Einschätzung der tatsächlichen Relevanz von Kriterien oder die Beurteilung, welche Kriterien zwingend in Kombination zu bewerten sind, könnte von ExpertInnen der Forschungsdisziplinen vorgenommen werden. Auch aus welchen Rohdatensätzen Kriterien am sinnvollsten abgeleitet werden sollten, können Fachspezialisten am besten beurteilen. Der folgende Kombinationsprozess richtet sich dann nach einer klaren und für alle nachvollziehbaren Logik. Diese erleichtert die Kollaboration verschiedenster Forschungsbereiche und die Förderung gemeinschaftlicher Arbeit ist immer ein Gewinn.

Literaturverzeichnis

- Borowitz, M., Battat, J., 2016. Multidisciplinary evaluation of next steps for human space exploration: Technical and strategic analysis of options. *Space Policy* 35, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2016.02.004>
- Carver, S.J., 1991. Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* 5, 321–339. <https://doi.org/10.1080/02693799108927858>
- Clark, R.N., 2009. Detection of Adsorbed Water and Hydroxyl on the Moon. *Science* 326, 562–564. <https://doi.org/10.1126/science.1178105>
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Carlson, R., Grundy, W., Noll, K., 2014. Spectroscopy from Space. *Rev. Mineral. Geochem.* 78, 399–446. <https://doi.org/10.2138/rmg.2014.78.10>
- Collins, M.G., Steiner, F.R., Rushman, M.J., 2001. Land-Use Suitability Analysis in the United States: Historical Development and Promising Technological Achievements. *Environ. Manage.* 28, 611–621. <https://doi.org/10.1007/s002670010247>
- Colwell, J.E., Batiste, S., Horányi, M., Robertson, S., Sture, S., 2007. Lunar surface: Dust dynamics and regolith mechanics. *Rev. Geophys.* 45. <https://doi.org/10.1029/2005RG000184>
- Comber, A.J., Wadsworth, R.A., Fisher, P.F., 2008. Using semantics to clarify the conceptual confusion between land cover and land use: the example of ‘forest.’ *J. Land Use Sci.* 3, 185–198. <https://doi.org/10.1080/17474230802434187>
- Cova, T.J., Church, R.L., 2000. Exploratory spatial optimization in site search: a neighborhood operator approach. *Comput. Environ. Urban Syst.* 24, 401–419. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(00\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(00)00015-6)
- Djachkova, M.V., Litvak, M.L., Mitrofanov, I.G., Sanin, A.B., 2017. Selection of Luna-25 landing sites in the South Polar Region of the Moon. *Sol. Syst. Res.* 51, 185–195. <https://doi.org/10.1134/S0038094617030029>
- Feldman, W.C., Maurice, S., Binder, A.B., Barraclough, B.L., Elphic, R.C., Lawrence, D.J., 1998. Fluxes of Fast and Epithermal Neutrons from Lunar Prospector: Evidence for Water Ice at the Lunar Poles. *Science* 281, 1496–1500.
- Garcia, R.F., 2012. Preliminary design study for a lunar solar power station using local resources. *Sol. Energy* 86, 2871–2892. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.027>
- Gibney, E., 2018. How to build a Moon base. *Nature* 562, 474–478. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07107-4>
- Jiang, H., Eastman, J.R., 2000. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 14, 173–184. <https://doi.org/10.1080/136588100240903>
- Koebel, D., Bonerba, M., Behrenwaldt, D., Wieser, M., Borowy, C., 2012. Analysis of landing site attributes for future missions targeting the rim of the lunar South Pole Aitken basin. *Acta Astronaut.* 80, 197–215. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.03.007>
- Li, S., Milliken, R.E., 2017. Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: Distribution, abundance, and origins. *Sci. Adv.* 3, e1701471. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701471>
- LROC Data Portal [WWW Document], 2021. URL http://wms.lroc.asu.edu/lroc/rdr_product_select (accessed 9.23.21).

- Lucey, P.G., 2009. A Lunar Waterworld. *Science* 326, 531–532.
<https://doi.org/10.1126/science.1181471>
- Malczewski, J., 2004. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Prog. Plan.* 62, 3–65. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2003.09.002>
- Malczewski, J., 2000. On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. *Trans. GIS* 4, 5–22.
<https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035>
- Malczewski, J., 1999. *GIS and multicriteria decision analysis*. J. Wiley & Sons, New York.
- Malczewski, J., 1996. A GIS-based approach to multiple criteria group decision-making. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* 10, 955–971.
<https://doi.org/10.1080/02693799608902119>
- Mateo Sanguino, T. de J., 2017. 50 years of rovers for planetary exploration: A retrospective review for future directions. *Robot. Auton. Syst.* 94, 172–185.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.04.020>
- Mazzetti, A., Gianotti Pret, M., Pinarello, G., Celotti, L., Piskacev, M., Cowley, A., 2019. Heat to electricity conversion systems for moon exploration scenarios: A review of space and ground technologies. *Acta Astronaut.* 156, 162–186.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.09.025>
- Meurisse, A., Makaya, A., Willsch, C., Sperl, M., 2018. Solar 3D printing of lunar regolith. *Acta Astronaut.* 152, 800–810. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.063>
- Mitrofanov, I.G., Sanin, A.B., Litvak, M.L., 2016. Water in the Moon's polar areas: Results of LEND neutron telescope mapping. *Dokl. Phys.* 61, 98–101.
<https://doi.org/10.1134/S1028335816020117>
- Montgomery, B., Dragičević, S., 2016. Comparison of GIS-Based Logic Scoring of Preference and Multicriteria Evaluation Methods: Urban Land Use Suitability: Comparison of GIS-LSP and MCE methods. *Geogr. Anal.* 48, 427–447.
<https://doi.org/10.1111/gean.12103>
- PDS Data Portal [WWW Document], 2021. URL https://pds-geosciences.wustl.edu/lro/lro-l-lola-3-rdr-v1/lrolol_1xxx/data/lola_gdr/polar/jp2/ (accessed 9.23.21).
- Pinto, N., Keitt, T.H., 2009. Beyond the least-cost path: evaluating corridor redundancy using a graph-theoretic approach. *Landsc. Ecol.* 24, 253–266.
<https://doi.org/10.1007/s10980-008-9303-y>
- Saaty, T.L., 2004. Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *J. Syst. Sci. Syst. Eng.* 13, 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>
- Saaty, T.L., 1984. The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments, in: Avenhaus, R., Huber, R.K. (Eds.), *Quantitative Assessment in Arms Control*. Springer US, Boston, MA, pp. 285–308.
https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2805-6_12
- Shao, M., Han, Z., Sun, J., Xiao, C., Zhang, S., Zhao, Y., 2020. A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection. *Renew. Energy* 157, 377–403. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.137>
- Sipahi, S., Timor, M., 2010. The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications. *Manag. Decis.* 48, 775–808.
<https://doi.org/10.1108/00251741011043920>

- Smith, D.E., Zuber, M.T., Neumann, G.A., Lemoine, F.G., Mazarico, E., Torrence, M.H., McGarry, J.F., Rowlands, D.D., Head, J.W., Duxbury, T.H., Aharonson, O., Lucey, P.G., Robinson, M.S., Barnouin, O.S., Cavanaugh, J.F., Sun, X., Liiva, P., Mao, D., Smith, J.C., Bartels, A.E., 2010. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA): LOLA INITIAL OBSERVATIONS. *Geophys. Res. Lett.* 37, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010GL043751>
- Speyerer, E.J., Robinson, M.S., 2013. Persistently illuminated regions at the lunar poles: Ideal sites for future exploration. *Icarus* 222, 122–136. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.10.010>
- Vaidya, O.S., Kumar, S., 2006. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *Eur. J. Oper. Res.* 169, 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>
- Wörner, J.-D., 2019. Bauen im Weltall: Neue Herausforderungen. *ce/papers* 3, 23–26. <https://doi.org/10.1002/cepa.970>
- Yager, R.R., 1988. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 18, 183–190. <https://doi.org/10.1109/21.87068>