



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt,
Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung

Schlussbericht

Einsatz von 3D GIS zur transparenten und nachhaltigen Planung von elektrischen Versorgungsnetzen



© ETH Zürich 2017



Datum: 31.12.2017

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Netze
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung und Projektpartner:

Austrian Power Grid AG
Wagramer Straße 19
A-1220 Wien
www.apg.at

BKW Energie AG
Viktoriaplatz 2
CH-3000 Bern
www.bkw.ch

Swissgrid AG
Werkstrasse 12
CH-5080 Laufenburg
www.swissgrid.ch

Auftragnehmerin:

ETH Zürich
Institut für Kartografie und Geoinformation
Stefano-Francini-Platz 5
CH-8093 Zurich
www.gis.ethz.ch

Autorenschaft:

Prof. Dr. Martin Raubal, IKG, ETH Zürich, mraubal@ethz.ch
Joram Schito, IKG, ETH Zürich, jschito@ethz.ch
Prof. Dr. Adrienne Grêt-Regamey, PLUS, ETH Zürich, gret@ethz.ch
Dr. Ulrike Wissen Hayek, PLUS, ETH Zürich, wissen@nsl.ethz.ch

BFE-Bereichsleitung:

Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung:

Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer:

SI/501073-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
Résumé 5	
Abstract 6	
1 Einleitung	7
1.1 Problemstellung	7
1.2 Zielsetzung.....	7
1.3 Vorgehen	8
2 Regulatorische Rahmenbedingungen.....	11
2.1 Sachplanverfahren	11
2.2 Vorgehen beim Planen von Leitungen	12
2.3 Multikriterielle Entscheidungsanalyse	13
3 Material und Methode.....	18
3.1 Entwicklung des 3D DSS.....	18
3.2 Datenmodell.....	20
3.3 Entscheidungsmodell	24
3.4 Berechnung von Planungsgebiet, Korridor und Trassee.....	31
3.5 Kostenberechnung	32
3.6 Sensitivitätsanalyse	32
3.7 Berechnung der Mastpositionen	35
3.8 Sichtbarkeit der Masten.....	36
3.9 Visualisierungsplattform – Architektur des 3D DSS	36
4 Resultate.....	38
4.1 3D DSS – Benutzeroberfläche, Einsatzschritte und Funktionen	38
4.2 Evaluation der Sensitivitätsanalyse.....	47
4.3 Resultate der Nutzerstudie	51
4.4 Resultate der Workshops	52
5 Diskussion.....	54
5.1 Technische Entwicklung des 3D DSS	54
5.2 Einsatz in der Praxis – Diskussion der Nutzerevaluation	56
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	59
7 Referenzen	60

Zusammenfassung

Die Planung neuer Leitungen ist ein aufwendiger Prozess. Gründe dafür sind unter anderem, dass sehr viele heterogene Aspekte berücksichtigt werden müssen, Planungsarbeiten vorwiegend noch manuell verrichtet werden, Berechnungen unterschiedlicher Leitungsvarianten lange dauern und Einsprachen aufgrund mangelnder Akzeptanz in der Bevölkerung den Planungsprozess verlangsamen. Deshalb wurde im Rahmen des Projekts «Einsatz von 3D GIS zur transparenten und nachhaltigen Planung von elektrischen Versorgungsnetzen» ein 3D Decision Support System (3D DSS) entwickelt, das Planer, Amtsvertreter und betroffene Parteien gleichermaßen im Planungsprozess von Leitungen unterstützen soll. Ziel war es, einen 3D DSS-Prototyp zu entwickeln, der zwischen zwei gegebenen Punkten im Raum unter Berücksichtigung unterschiedlicher, räumlich-expliziter Faktoren eine Kostenoberfläche berechnet und davon den optimalen Korridor und mögliche Trassees für eine Leitung ableitet. Dabei sollte das Vorgehen nach dem Sachplanverfahren berücksichtigt werden.

Für die Entwicklung des 3D DSS-Prototyps wurden für einen Betrachtungsraum zuerst GIS-Daten zu relevanten räumlichen Faktoren bezüglich Raum und Umwelt sowie zu technischen Aspekten zusammengestellt. Diese wurden dann so aufbereitet, dass sie gegeneinander abgewogen werden konnten. Modelle für multikriterielle Entscheidungsanalysen (MCDA) wurden entwickelt, mit denen basierend auf den gewichteten Faktoren eine Raumwiderstandskarte für den gesamten Betrachtungsraum berechnet wird. Zur Modellierung eines Planungsgebiets sowie eines möglichen Korridors wurde eine Least Cost Path (LCP)-Analyse generiert. Des Weiteren wurde ein Algorithmus erarbeitet, der für berechnete Korridore die indikativen Baukosten ermittelt. Für den Zugriff auf die Grundlagendaten und Modellierungsalgorithmen zur Berechnung von Raumwiderstandskarten, Planungsgebieten und Korridoren wurde ein Web-Interface entwickelt. In diesem Interface wurde der Web-basierte Globus CESIUM als Viewer eingebettet, auf dem die berechneten Korridore und Trassees in 3D visualisiert werden.

Die verschiedenen MCDA-Modelle, die im 3D DSS verwendet werden können, wurden mit einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass MCDA-Modelle, die sich überlappende Schutzgebiete berücksichtigen und ein kontinuierliches Begrenzungsmodell anwenden, einen Schutz von Landschaft und Lebensraum begünstigen und Siedlungsgebiete weitgehend umgehen. Wie das 3D DSS in der Praxis eingesetzt werden kann und wie gut seine Funktionen sind, wurde in einer Nutzerstudie und in drei Workshops in Zusammenarbeit mit Projektpartnern getestet. Mit dem 3D DSS können Alternativen schnell berechnet werden und es kann bei der Diskussion um geeignete Alternativen als Kommunikationsplattform dienen, um zu einer breit abgestützten Lösung zu gelangen. Während die Funktionsweise des Prototyps grundsätzlich gut ist, wurde das 3D DSS bezüglich der Resultate der Algorithmen noch als zu theoretisch beurteilt. Um tatsächlich für den Einsatz in der Praxis geeignet zu sein, ist eine weitere Kalibrierung, insbesondere der Datengrundlagen und der Möglichkeiten zum Einstellen der Widerstände und Gewichtungen von Kriterien, notwendig. Darüber hinaus sollte der Berechnungsalgorithmus Erdleitungen in Kombination mit Freileitungen berücksichtigen. Mit einem weiterentwickelten 3D DSS steht der Praxis ein wertvolles Instrument zur Verfügung, mit dem die Diskussion, die Transparenz und die Offenheit in Planungsprozessen von Leitungen gefördert werden kann.

Résumé

La planification de nouvelles lignes de transmission est une tâche qui prend beaucoup de temps, car de très nombreux aspects extérieurs doivent être considérés pour la prise de décision et une grande partie du travail de calcul des solutions alternatives se fait manuellement. De plus, la planification des lignes de transmission est souvent influencée par une forte opposition sociale, ce qui peut entraîner des retards et, par conséquent, une augmentation des coûts. Dans le cadre du projet « Intégration d'un GIS 3D pour une planification transparente et durable de réseaux d'approvisionnement en électricité », nous avons mis au point un système intégré d'aide à la décision en 3D (3D DSS) pour aider les planificateurs, les fonctionnaires et les citoyens concernés par le processus de planification de nouvelles lignes de transmission. L'approche développée modélise le corridor optimal ainsi qu'un trajet de ligne de transmission possible entre deux points arbitraires en considérant la procédure selon le plan sectoriel pour les lignes de transmission (SÜL). Le déroulement des opérations devant tenir compte bien entendu du processus de planification.

Afin de satisfaire aux exigences légales, nous avons construit un modèle de décision basé sur les géo-données disponibles qui permet aux utilisateurs de pondérer les différents facteurs concernant l'environnement, l'aménagement du territoire et les prérequis techniques les uns par rapport aux autres. Nous avons ensuite utilisé des concepts géospatiaux pour transférer cette information sur une carte (Least Cost Path (LCP)) qui détermine le niveau de couverture nécessaire pour une zone déterminée. Un algorithme d'analyse de la voie la moins coûteuse permet ensuite de déterminer le corridor et la trajectoire optimale ainsi que les coûts engendrés. Enfin, nous avons implémenté l'approche décrite ci-dessus dans une interface web tout en utilisant l'application CESIUM comme globe virtuel pour représenter les couloirs, chemins et positions de pylônes en 3D. De cette façon, les utilisateurs peuvent rapidement calculer les coûts et les représentations virtuelles en fonction des choix et prendre une décision.

En outre, nous avons étudié l'effet des différents modèles MCDA en effectuant une analyse de sensibilité. Les résultats montrent que les modèles MCDA qui prennent en considération les régions protégées se chevauchant et qui utilisent un modèle de limitation permanent, favorisent la protection de la campagne et des zones habitée et contournent largement les agglomérations urbaines. De plus, nous avons réalisé une étude d'utilisateurs et organisé trois ateliers de travail pour obtenir les commentaires des experts industriels et évaluer les résultats afin d'optimiser les fonctionnalités du 3D DSS. Le 3D DSS est capable de calculer rapidement des solutions alternatives, ce qui permet de fournir une plateforme de communication qui facilite les discussions en vue de déterminer une solution consensuelle. Bien que les experts aient évalué positivement les fonctionnalités du 3D DSS, le modèle est considéré comme encore trop théorique en rapport avec les résultats des algorithmes. Un calibrage supplémentaire s'avère nécessaire avant une mise en service effective. Plus particulièrement au niveau des bases de données et de la possibilité d'ajustement des résistances et de la pondération des différents critères. De plus, l'algorithme de calcul doit optimiser la relation entre les prises de terre et les lignes aériennes. Le 3D DSS ainsi développé pourrait être un instrument précieux dans la pratique, car il soutient efficacement les discussions et favorise la transparence dans les processus de planification des lignes de transmission.

Abstract

Planning transmission lines is a time consuming task as various aspects must be considered for decision-making and much work for computing path alternatives is done by hand. Furthermore, transmission line planning is often impacted by strong social opposition, which may lead to delays and thus, increase costs. We thus developed an integrated 3D Decision Support System (3D DSS) to support planners, officials, and affected citizens during the planning process for a new transmission line. The developed approach models the optimal corridor as well as a possible transmission line path between two arbitrary points by considering the procedure according to the sectoral plan for transmission lines (SÜL).

In order to satisfy legal requirements, we built a decision model based on available geodata that allows users to weight different factors concerning environment, spatial planning, and technical prerequisites against each other. We then used geospatial concepts to transfer this information onto a map that represents how worthy an area is of being protected. From this map, the optimal corridor, a possible path, and the expected costs could be derived by applying a Least Cost Path (LCP) analysis. Last, we implemented the described approach in a web interface while using CESIUM as virtual globe to represent the resulting corridors, paths, and pylon positions in 3D. In this way, users could quickly generate the resulting costs and virtual representations based on the decisions they took.

Furthermore, we investigated the effect of different MCDA models by conducting a sensitivity analysis. The results show that landscape and urban areas can be protected from building a power line by applying a decision model that considers overlapping and a continuously decreasing protective effect over its borders. Furthermore, we conducted three workshops to obtain experts' feedback and evaluated the results of three user studies to improve the 3D DSS. Since the 3D DSS quickly computes alternatives, it is appropriate to support discussions for determining a consensus alternative. Whereas experts assessed the 3D DSS good functionality, the model needs to be further calibrated to be applicable in practice. Furthermore, the developed approach is optimized for determining overhead lines. Thus, the developed 3D DSS might be complemented by an approach that determines earth cables and combines them with overhead lines. An extended 3D DSS would be a valuable instrument in practice as it supports discussions and fosters transparency in the planning of transmission lines.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Planung neuer Leitungen ist ein aufwendiger Prozess, da technische, gesetzliche, sicherheitsrelevante, raumpolitische, wirtschaftliche Kriterien sowie Umweltschutzaspekte mitberücksichtigt werden müssen. Zudem ist der Planungsprozess langwierig, weil viele Planungsschritte vorwiegend noch manuell verrichtet werden und die Berechnung unterschiedlicher Varianten lange dauert. Außerdem führt mangelnde Akzeptanz der Bevölkerung zu Einsprachen (Jullier 2016; Rendigs 2016; Lienert, Süterlin, und Siegrist 2017), was den Planungsprozess verlangsamt und dadurch Folgekosten verursacht. Allfällige Projektverzögerungen führen zudem dazu, dass die Versorgungssicherheit negativ beeinflusst wird.

Um diese Kausalkette zu durchbrechen und folglich deren negative Effekte zu mindern, wurde das vorliegende Projekt zur Planung eines 3D Decision Support Systems (3D DSS) durchgeführt. Die ETH Zürich stellte mit dem Institut für Kartografie und Geoinformation – Lehrstuhl für Geoinformations-Engineering (IKG-GIE) und dem Institut für Raum und Landschaftsentwicklung – Planung von Landschaft und Urbanen Systemen (IRL-PLUS) das wissenschaftliche Projekttteam. Das Bundesamt für Energie (BFE) förderte das vorliegende Projekt im Rahmen des Forschungsprogramms Netze. Fachlich und finanziell wurde das Projekt von den Projektpartnern Swissgrid, BKW und APG unterstützt. Fachlich unterstützt hat das Projekttteam zudem das Bundesamt für Umwelt (BAFU), das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), das Bundesamt für Kultur (BAK), die Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) und das Swiss Competence Center for Energy Research – Future Swiss Electrical Infrastructure (SCCER-FURIES).

1.2 Zielsetzung

Das Forschungsprojekt verfolgte zwei primäre Ziele: Erstens sollte erforscht werden, wie eine Applikation aufgebaut sein muss, um Zeit und Kosten während des Planungsprozesses neuer Leitungen einzusparen. Zweitens sollte die Applikation die Meinungen unterschiedlicher Stakeholder einbinden, um daraus eine Konsenslösung zu berechnen, die breit abgestützt ist und eine hohe Akzeptanz geniesst. Dabei sollte eine Applikation in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern entwickelt werden, die eine wissenschaftlich begründete Grundlage für ein markttaugliches Produkt bietet. Die Applikation sollte nicht nur Planer bei der Findung neuer Korridore und Trassen unterstützen, sondern auch Meinungen und Vorschläge der Betroffenen über eine integrierte Kommunikationsplattform in den Planungsprozess einbinden.

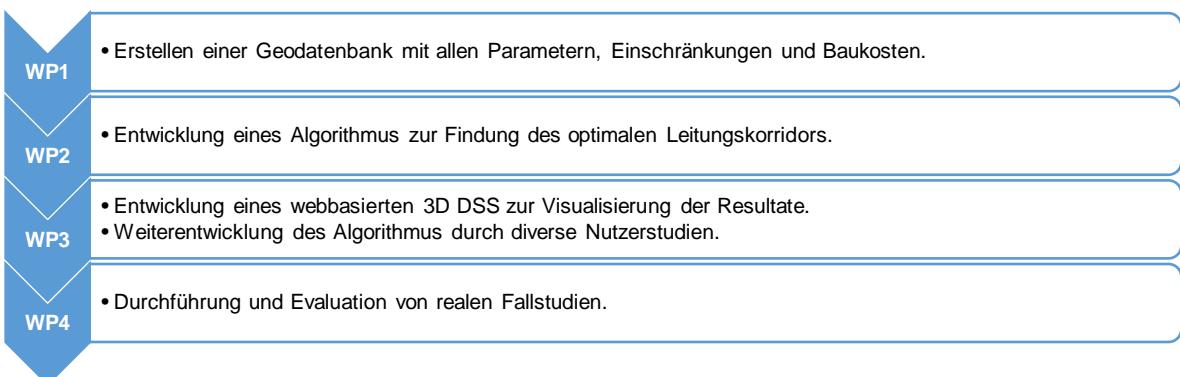
Die Tauglichkeit wurde darüber definiert, ob die Applikation realistische Lösungen zu berechnen vermag. Dieser Grad an Realismus wurde dabei von Experten bewertet, die sich mit der Planung von Leitungen und des Genehmigungsprozesses innerhalb des Sachplanverfahrens (UVEK 2001) befassen. Daher sollte die entwickelte Applikation gesetzliche Vorgaben der Leitungsverordnung (Bundesrat der Schweizerischen Eidgenossenschaft 1994) und der NISV (Bundesrat der Schweizerischen Eidgenossenschaft 1999) mitberücksichtigen und die Vorstellungen erfahrener Planer so genau wie möglich abbilden können. Das Forschungsteam stützte sich dabei auf die in der Vollzugshilfe zur NISV (Baumann und Joss 2007) aufgelisteten Empfehlungen und auf das Wissen und die Erfahrung mehrerer Experten.

Im Fokus stand dabei, ein wissenschaftlich fundiertes Verfahren zu entwickeln, das die Eignung eines bestimmten Gebietes unter der Berücksichtigung gesetzlicher Schutzvorgaben für einen Leitungskorridor ermittelt, quantifiziert und in 3D visualisiert. Darüber hinaus sollten die indikativen Baukosten für eine neue Leitung geschätzt werden. Auch wenn im vorliegenden Projekt Höchstspannungsleitungen modelliert wurden, sollte der entwickelte Ansatz auch auf andere lineare Infrastruktursysteme wie z.B. Wasser-, Glasfaser- oder Gasleitungen anwendbar sein.

1.3 Vorgehen

1.3.1 Übersicht über die Workpackages

Das Projekt wurde in vier aufbauende Workpackages (WP) gegliedert:



Die einzelnen Workpackages werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

1.3.2 Workpackage 1: Vorbereitung und Modellierung

In einem vorbereitenden Schritt wurde aufgrund der Fragestellung und den Interessensabwägungen aller Projektteilnehmer festgelegt, welche Parameter in die Modellierung einfließen sollen. Das Planen der Geodatenstruktur unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben und der technischen Möglichkeiten nahm dabei einen zentralen Punkt ein. Anschliessend wurden die entsprechenden Quellen eruiert und angefragt. Die erhaltenen Daten wurden in einer Datenbank auf einem Server der ETH Zürich abgelegt, gefiltert, einheitlich attribuiert und wo noch nicht vorhanden, vollständig dokumentiert.

1.3.3 Workpackage 2: Entwicklung des Modellierungsalgorithmus

Das zweite Workpackage diente hauptsächlich der Entwicklung des Algorithmus zur Berechnung eines geeigneten Korridors inklusive der indikativen Baukosten. Der Algorithmus wurde anfangs mit der Skriptsprache Python und der Bibliothek ArcPy implementiert, wobei Effizienzgründe das Forscherteam später dazu bewegten, auf GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) basierende Open Source Libraries zu verwenden. Beim Vorgehen zur Berechnung des optimalen Korridors und möglicher Pfade wurde das Least Cost Path-Verfahren gewählt – ein Verfahren, das sich im Laufe der letzten 30 Jahre zur Lösung ähnlicher Probleme als Quasistandard etabliert hat. Dieses wurde aufgegriffen und für die realistische Berechnung von Korridoren und Pfaden angepasst. Zur Erstellung und mathematischen Verrechnung eines Entscheidungsmodells wurde eine MCDA verwendet. Als Basis für

das Entscheidungsmodell diente dabei das «Bewertungsschema für Übertragungsleitungen» (UVEK 2013), das zugunsten einer einfacheren Entscheidungsfindung mit weniger Kriterien später optimiert wurde. Der erste Prototyp des Entscheidungsmodells wurde anhand eines Studiengebiets in Niederösterreich optimiert, für welches der Projektpartner APG Daten zur Verfügung gestellt hatte (siehe Abbildung 9, Abbildung 12 und Abbildung 29). Somit konnten die Ergebnisse der Simulationen im 3D DSS mit den tatsächlichen, erst kürzlich getroffenen Entscheidungen verglichen und entsprechend angepasst werden. Dabei wurde post-hoc mit der Anpassung des Algorithmus und von Gewichtungen versucht, möglichst nahe an die tatsächlich erarbeitete Planungslösung zu gelangen.

1.3.4 Workpackage 3: Entwicklung einer 3D-Benutzerschnittstelle

Im dritten Schritt wurden unterschiedliche Entscheidungsmodelle einander gegenübergestellt und auf die Handhabbarkeit der Resultate hin evaluiert. Für die Steuerung und den Output wurde ein Web-Interface entwickelt, in welches anfangs der Web-Globus Google Earth und später, nach Einstellung des API-Dienstes von Google Earth, CESIUM als Open Source Alternative eingebunden wurde. Die Einbettung eines von Swisstopo für CESIUM aufbereiteten Höhenmodells mit Orthophotos verbesserte dabei die Qualität im Vergleich zu den in CESIUM bereitgestellten Standarddaten. Das Forscherteam entwickelte einen Ansatz, wie die Resultate der Algorithmen aus dem zweiten Workpackage in der Visualisierungsumgebung dargestellt werden können. Dabei kann der Nutzer die Resultate sowohl flächig in einem 2D-Modus, als auch in einem 3D-Modus darstellen lassen. Darüber hinaus wurden Punktwolken von LiDAR-Daten aufbereitet und können auf dem Web-Globus angezeigt werden, um den visuellen Detailgrad z. B. der Vegetation oder von Gebäuden in der 3D-Ansicht zu erhöhen. Speziell für den 3D-Modus wurden zudem zwei Verfahren entwickelt und evaluiert, welche die exakten Mastpositionen berechnen. Das 3D DSS wurde so ausgelegt, dass Änderungen am berechneten Trasse vorgenommen werden können und die Ausrichtung der Masten sowie der Durchhang der Leitungen automatisch berechnet und visualisiert werden.

1.3.5 Workpackage 4: Durchführung und Auswertung von Fallstudien

Im letzten Schritt wurde eine Evaluierung des 3D DSS durch reale Fallstudien durchgeführt. Dabei wurde eine Sensitivitätsanalyse angewandt, in der alle möglichen Einstellungen des 3D DSS auf ihre Wirkung auf das Resultat getestet wurden. Die Studie konzentrierte sich in der Schweiz auf das Gebiet zwischen Innertkirchen und Mettlen und in Österreich auf das Klagenfurter Becken in Kärnten zwischen Villach und Obersielach (siehe Abbildung 1). In beiden Fällen soll in den entsprechenden Gebieten das Netz durch eine 380 kV-Leitung modernisiert werden, um den steigenden Stromkonsum in den Zentren abzudecken und um Stromschwankungen aufgrund der dezentralen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien besser abzufedern. Konkret soll die Leitung zwischen Innertkirchen und Mettlen den Nord-Süd-Transport zwischen den Produktionsorten (Süden) und den Verbraucherzentren (Norden) entlasten, während die Leitung in Kärnten den geplanten 380 kV-Ring um Österreich schliessen soll. Beide Gebiete sind sich bezüglich der Morphologie ähnlich, da sich Berge und Täler gegenseitig abwechseln. In Kärnten wurde das Untersuchungsgebiet etwas mehr auf die Flachebene des Klagenfurter Beckens beschränkt, während in Innertkirchen – Mettlen die Breite des Untersuchungsgebiets für diese Studie auf das Gebiet zwischen den Tälern Entlebuch, Sarneraatal und Engelbergtal festgelegt wurde, das sich in Richtung Mettlen zum Mittelland hin öffnet. Um die modellierten Leitungskorridore innerhalb dieser Studiengebiete zu untersuchen, wurde ein Analysepro-

gramm entwickelt, das auf der Verwendung von Python und R beruht und die berechneten Raumkosten, Korridore und Pfade evaluiert. Des Weiteren wurden mehrere Nutzerevaluationen der Plattform durchgeführt und ausgewertet (Wissen Hayek und Schito 2017).

In diesem Bericht werden im Kapitel 2 die regulatorischen Rahmenbedingungen beim Planen von Hochspannungsleitungen sowie das Prinzip der Multikriteriellen Entscheidungsanalyse erklärt. Das Kapitel 3 präsentiert die verwendeten Daten, erarbeiteten Algorithmen und die Architektur der Visualisierungsplattform des 3D DSS. Im Kapitel 4 werden der 3D DSS-Prototyp sowie die Resultate der Sensitivitätsanalyse und der Evaluation des 3D DSS-Prototyps in den Nutzerstudien vorgestellt. Die Diskussion der Resultate hinsichtlich der technischen Entwicklung des 3D DSS sowie der Praxistauglichkeit des Prototyps erfolgt in Kapitel 5. Schliesslich werden im Kapitel 6 wesentliche Schlussfolgerungen gezogen und ein Ausblick zur möglichen Weiterentwicklung des 3D DSS-Prototyps gegeben.

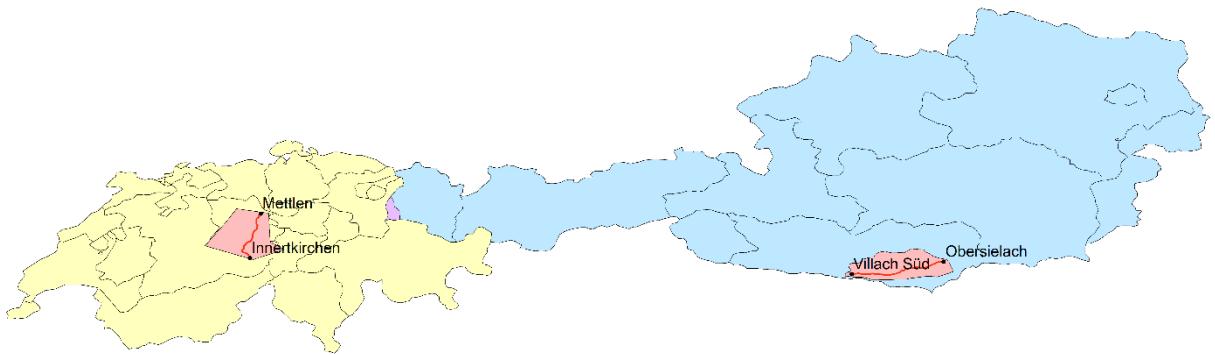


Abbildung 1: Generalisierte Übersichtskarten der Schweiz (nach Kantonen; gelb), Liechtenstein (violett) und Österreichs (nach Ländern; blau). Rot dargestellt sind die Studiengebiete mitsamt einem zufällig modellierten Trassee für eine mögliche Hochspannungsleitung, welches jeweils den Start- und den Endpunkt miteinander verbindet.

2 Regulatorische Rahmenbedingungen

2.1 Sachplanverfahren

2.1.1 Rechtliche Abstützung des Sachplans Übertragungsleitungen

Art. 75 BV legt fest, dass der Bund über die Grundsätze der Raumplanung bestimmt. Das Raumplanungsgesetz (RPG) ist die gesetzliche Basis der raumplanerischen Instrumente und Massnahmen, deren Anwendung in der Raumplanungsverordnung (RPV) weiter präzisiert wird. Da der Bund Vorschriften über den Transport und die Lieferung elektrischer Energie erlässt (Art. 91 Abs. 1 BV) und die Oberaufsicht bei der Erstellung und dem Betrieb von Schwach- und Starkstromanlagen hat (Art. 1 EleG), liegt es an ihm, für die Übertragungsleitungen mit erheblichen Auswirkungen auf Raum und Umwelt einen Sachplan nach Artikel 13 RPG zu erarbeiten (Art. 14 Abs. 1 RPV). Dieser wird fortan als Sachplan Übertragungsleitungen (SÜL) bezeichnet.

2.1.2 Inhalt und Zweck des Sachplans Übertragungsleitungen

Der Zweck des SÜL liegt darin, den Aus- und Neubau von 220-kV und 380-kV-Leitungen zu regeln. Dabei sollen Korridorvarianten beurteilt, allfällige Konflikte auf übergeordneter Stufe aufgedeckt und bereinigt und die geeignete Korridorvariante für geplante Leitungsbauvorhaben bestimmt werden, bevor Detailprojektierungen getätigt werden (UVEK 2001). Dadurch soll erreicht werden, dass der ganze Planungsprozess strukturiert und so breit wie möglich abgestützt wird, womit das auf das Sachplanverfahren folgende Plangenehmigungsverfahren entlastet und vereinfacht wird. Der SÜL ist in einen allgemein gültigen Konzeptteil und einen Objektteil gegliedert, welcher in Form von Objektblättern die raumplanerischen Aussagen zu den einzelnen konkreten Vorhaben umfasst. Der SÜL erfüllt für den Bund, die Kantone, Swissgrid und die Bevölkerung sowohl eine Planungsfunktion wie auch eine Koordinationsfunktion (Variantenentscheid für konkrete Vorhaben unter Berücksichtigung der Anliegen der betroffenen Akteure) und eine Informationsfunktion (transparente Kommunikation über die Planung). Insgesamt trägt der SÜL damit zur Akzeptanz eines Vorhabens durch die meisten betroffenen Akteure bei.

2.1.3 Vorgehen zur Erstellung eines Objektblattes des Sachplans Übertragungsleitungen

Die Federführung für ein SÜL-Verfahren zur Erstellung oder Anpassung eines Objektblatts liegt beim Bundesamt für Energie (BFE), welches dabei eng mit dem Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) zusammenarbeitet. Die Erarbeitung eines SÜL-Objektblatts wird durch eine Begleitgruppe unterstützt, in welcher die betroffenen Bundesstellen, Kantone, Swissgrid und schweizweit tätige Umweltschutzorganisationen vertreten sind. Der SÜL berücksichtigt die kantonalen Richtpläne und im Falle eines Konflikts mit einem kantonalen Richtplan erfolgt eine Koordination mit der entsprechenden Anpassung des kantonalen Richtplans. Seit 2014 werden Sachplanverfahren oftmals zweistufig durchgeführt; zuerst wird ein weiträumigeres Planungsgebiet festgelegt bevor der Planungskorridor bestimmt wird. Bevor ein Planungsgebiet oder ein Planungskorridor durch den Bundesrat festgelegt wird, wird gemäss Art. 19 RPV eine Anhörung bei den betroffenen Kantonen und Gemeinden sowie eine öffentliche Information und Mitwirkung durchgeführt.

Die Festsetzung eines Planungskorridors für ein Leitungsbauvorhaben im SÜL und die entsprechenden Erläuterungen dazu enthalten Aussagen, welche einem Pflichtenheft gemäss Art. 8 UVPV entsprechen und legen damit den Rahmen für den Umweltverträglichkeitsbericht (UVB) im auf das Sachplanverfahren folgende Plangenehmigungsverfahren (PGV) fest. Die im Laufe des Sachplanverfahrens vorgenommene Variantenevaluation umfasst ihrerseits bereits Abklärungen, welcher in Umfang und Tiefe einer Voruntersuchung gemäss Art. 8 UVPV entsprechen.

Erst wenn Swissgrid für das Plangenehmigungsverfahren das Detailprojekt ausarbeitet, wird der UVB erstellt. Der UVB vertieft hauptsächlich die kleinräumigen, linienspezifischen Umweltbelange innerhalb des Planungskorridors, welcher im SÜL festgelegt wurde. Das BAFU beurteilt den UVB im Rahmen des PGV, gestützt auf die kantonale(n) Stellungnahme(n) und in Kenntnis weiterer relevanter Gesuchsunterlagen wie z.B. Einsprachen oder Beschwerden.

2.2 Vorgehen beim Planen von Leitungen

2.2.1 Definition der Planungsinstanzen

Das Vorgehen nach SÜL und PGV gibt gewissermassen vor, dass sich der Betrachtungsraum der Analyse schrittweise verkleinert, während sich der Detaillierungsgrad erhöht. Dieses Prinzip wird auch bei Leitungsbaprojekten in anderen Ländern angewandt. Nefzger et al. (2003) beschrieben dieses Vorgehensprinzip ausführlich und Houston und Johnson (2006) benannten es in ihrem Bericht als «Funnel Approach», einem Ansatz, der das Analysegebiet schrittweise und trichterförmig verkleinert. Im Gegenzug wird versucht, mehr und genauere Daten (bezüglich der Auflösung der geometrischen oder attributiven Genauigkeit) in das Datenmodell zu integrieren. Dies hat zur Folge, dass das Entscheidungsmodell mit jeder Stufe – idealerweise im Konsens mit allen beteiligten Stakeholdern – schrittweise angepasst werden muss.

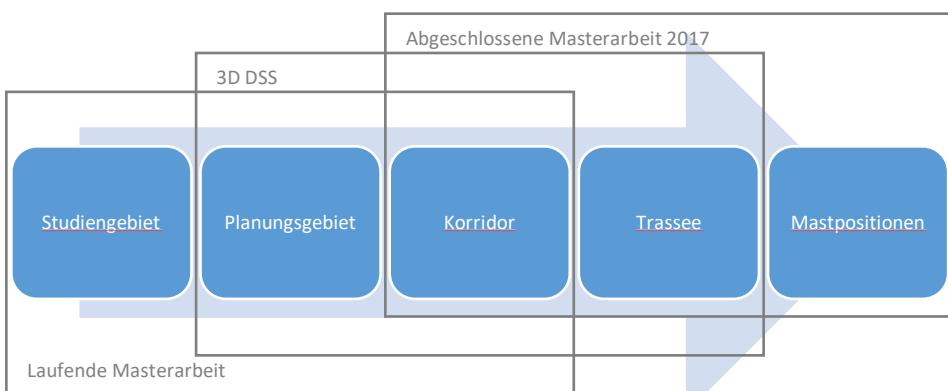


Abbildung 2: Der Funnel Approach zeigt, dass jede folgende Einheit durch eine schrittweise Verkleinerung der vorherigen Einheit erreicht wird. Je weiter der Prozess fortschreitet, desto mehr und höher aufgelöste Datensätze werden verwendet. Das Forschungsprojekt bewegt sich in den mittleren drei Einheiten, wohingegen die äusseren Einheiten durch Masterarbeiten abgedeckt werden.

In der Planungspraxis gilt, dass jede Instanz der Elemente in Abbildung 2 (ausser die Letzte) mehrere untergeordnete Instanzen haben sollte. In einem Studiengebiet sollten sich mehrere Planungsgebiete festlegen lassen; in einem Planungsgebiet soll es mehrere Korridorvarianten geben und jede Korridorvariante soll mehrere Trasseevarianten beinhalten, während die Masten ohnehin relativ flexibel

positioniert werden können (Nefzger, Nolasco, und Kaintzyk 2003; Weber 2015; Experten am Swissgrid-Workshop 2017).

2.2.2 Räumliche Ausdehnung der Planungsinstanzen

Bezüglich der räumlichen Ausdehnung der oben dargestellten Planungsinstanzen geben Nefzger et al. (2003) an, dass diese von Fall zu Fall unterschiedlich sein kann und von den natürlichen Gegebenheiten (Terrain, Gewässer, etc.) abhängt. Üblicherweise ist ein Planungsgebiet mehrere hundert Meter bis mehrere Kilometer breit, wohingegen ein Korridor auf ca. 150–500 Meter beschränkt ist. Das Trassee per se ist auf die Breite der Leitungsanlage beschränkt (Weber 2015; Bräunlich 2017; Experten am Swissgrid-Workshop 2017).

Abstände, die zu Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) und Orten für den kurzfristigen Aufenthalt (OKA) eingehalten werden müssen, werden in der NISV (Bundesrat der Schweizerischen Eidgenossenschaft 1999) definiert. Hierbei spielen in der Planungspraxis einerseits die Definition der OMEN und OKA sowie auch die Definition des Immissions- und des Anlagegrenzwerts eine wichtige Rolle. Der Untersuchungsperimeter ist dabei der Korridor, der sich durch die maximale laterale Ausbreitung des Anlagegrenzwerts auf beide Seiten der Leitung hin ergibt (Baumann und Joss 2007). Diese laterale Ausbreitung hängt davon ab, welchen maximalen Strom die Leitung führen kann und wie die Leiter geometrisch angeordnet sind. Im letzteren Fall sind die Mastbilder der Freileitungen und die Frage, ob die Leitung im Boden (teil-)verkabelt wird, die entscheidenden Faktoren zur lateralen Ausdehnung des Untersuchungsperimeters. Eine Leitung muss gemäss der NISV so geplant werden, dass OMEN ausserhalb des Untersuchungsperimeters liegen.

2.3 Multikriterielle Entscheidungsanalyse

Die Multikriterielle Entscheidungsanalyse (Engl.: Multiple Criteria Decision Analysis, MCDA) bietet eine Vielzahl an Verfahren an, um anhand mehrerer Faktoren einen auf mathematischen Prinzipien basierten Entscheid zu fällen. Der Entscheid wird durch MCDA nicht objektiv (da jeder Entscheid auf subjektiven Erwartungen und Präferenzen basiert), doch können dadurch subjektive Einschätzungen rational ausgedrückt werden. Durch MCDA werden Probleme strukturiert und Unsicherheiten in der Analyse abgebildet. MCDA gilt als fair und transparent, weil unterschiedliche Meinungen und Bewertungen in die Entscheidungsfindung miteinbezogen werden können, wobei ersichtlich und nachvollziehbar ist, weshalb es zu einem bestimmten Entscheid gekommen ist (Eisenführ, Weber, und Langer 2010).

2.3.1 Generelle Vorgehensweise der Multikriteriellen Entscheidungsanalyse

Da es keine verbindliche Abfolge gibt, nach der eine MCDA ablaufen muss, schlagen die Autoren des vorliegenden Berichts mit Verweis auf vorherige Arbeiten (Figueira, Greco, und Ehrgott 2005; Eisenführ, Weber, und Langer 2010; Zheng, Egger, und Lienert 2016) die folgende Abfolge vor:

Der erste Schritt bildet die Problemerkennung, indem das Problem erkannt und dessen Rahmenbedingungen festgelegt werden. In einem nächsten Schritt werden die Stakeholder definiert und deren Interessen ermittelt. Anhand der Antworten wird das Problem neu definiert, strukturiert und ein Entscheidungsmodell erstellt. Dabei wird ein Zielhierarchiesystem festgelegt, das verschiedene Ziele in

einer Hierarchie ordnet. Die Ziele werden so definiert, dass die entsprechenden Probleme als gelöst gelten, wenn das (Teil-)Ziel erreicht wird. Um zu messen, ob ein Ziel erreicht worden ist, müssen in einem nächsten Schritt Attribute definiert bzw. operationalisiert und Schwellwerte definiert werden. Wird ein bestimmter Schwellwert übertroffen, gilt das entsprechende (Teil-)Ziel als erreicht.

In einem nächsten Schritt werden *Alternativen* erstellt. Alternativen repräsentieren unterschiedliche Szenarien, die sich ergeben, wenn man die Einstellungen des Entscheidungsmodells ändert. Besteht das Entscheidungsmodell aus messbaren Werten, sogenannten *Attributen*, führt jedes unterschiedliche Setting an möglichen Werteinstellungen zu unterschiedlichen Alternativen. Nun ist es nicht das Ziel, möglichst viele Alternativen zu bilden, sondern nur eine übersichtliche Anzahl, aus der die Entscheidungsträger dann die beste Alternative wählen. Wichtig ist, dass sich die Alternativen voneinander unterscheiden und bestenfalls als Konsenslösung innerhalb einer Gruppe entstanden sind (Eisenführ, Weber, und Langer 2010).

Die unterschiedlichen Alternativen werden anschliessend nach ihrer Güte geordnet und weiter eingeschränkt. Dazu wird die sogenannte *Multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA)* angewandt, bei der mehrere Einflussfaktoren (= Kriterien) in einem Entscheidungsmodell berücksichtigt werden, um einen Entscheid möglichst so zu fällen, dass er im Nachhinein nicht bereut wird (Belton und Stewart 2002). Wird im Entscheidungsmodell bestimmt, dass jeder Einflussfaktor als messbarer Wert ausgedrückt werden kann (= Attribut), so können die Werte als *Nutzen* definiert werden, je nachdem, ob ein hoher Wert den Nutzer von einem Entscheid überzeugen oder abbringen soll. Werden mehrere Faktoren berücksichtigt, so können diese Teilnutzen zu einem Endnutzen zusammengerechnet werden, sofern sie standardisiert sind. Ist der Endnutzen ausreichend hoch um das entsprechende (Teil-)Ziel zu erfüllen, kann die zugehörige Alternative weiter in Betracht gezogen werden.

In einem letzten Schritt geht es darum, aus einem Setting an Alternativen schliesslich die rational beste Lösung zu finden. Angenommen, dass ein Entscheidungsträger letztlich die Alternative mit dem höchsten Endnutzen auswählt, so muss auch die Frage geklärt werden, wie viel die Teilnutzen zum Endnutzen beitragen sollen. Dies entscheidet der Entscheidungsträger aufgrund seines eigenen Ermessens mithilfe zweier Ansätze: Erstens setzt er für jeden Einflussfaktor eine Gewichtung, die aussagt, wie wichtig ihm der Entscheid ist, der letztlich zur Erreichung oder Nichterfüllung eines (Teil-)Ziels führt. Eine höhere Gewichtung trägt dazu bei, dass der entsprechende Einflussfaktor mehr zur Berechnung des Endnutzens und letztlich zur Erreichung des (Teil-)Ziels beiträgt. Zweitens legt der Entscheidungsträger fest, wie gross der Erwartungsnutzen des Entscheids auf den Endnutzen sein soll, wenn sich die Stärke des Attributwerts ändert. Da beide Funktionen Präferenzen abbilden und somit subjektiv sind, sollten sie durch den Einsatz geeigneter Fragetechniken von jedem Entscheidungsträger individuell ermittelt werden. Schliesslich bestimmen die Entscheidungsträger darüber, welches mathematische Aggregationsmodell verwendet werden soll, d.h., durch welche Formel der Endnutzen eines Szenarios berechnet wird.

Dieser Findungsprozess kann weiter unterstützt werden, indem der Lösungsraum des Entscheidungsmodells ermittelt wird. Dazu wird für jedes Entscheidungsmodell und für jedes Studiengebiet eine sogenannte *Sensitivitätsanalyse* durchgeführt. Dabei werden die Endnutzen aller Szenarien berechnet, was das mathematische Endresultat der MCDA darstellt. Dies erlaubt es, weiterführende Analysen durchzuführen und dabei dominante Einflussfaktoren zu identifizieren, die einen hohen Einfluss auf eine Tendenzbildung der Resultate haben. Sind sich die Entscheidungsträger nämlich bewusst, welche Einflussfaktoren wie stark zur (räumlichen) Ausprägung der Endlösung beitragen, so kann das Entscheidungsmodell im Gremium diskutiert und allenfalls angepasst werden. Ein reflektierter Umgang mit dem Entscheidungsmodell trägt somit zur Erhöhung der Transparenz und zur Vereinfachung der Entscheidungsfindung bei. Anwendung auf räumliche Probleme

MCDA kann auch auf räumliche Probleme angewandt werden (Malczewski 1999). Das mathematische Prinzip der MCDA bleibt dabei gleich. Speziell dabei ist, dass die zu bewertenden Attribute räumlich-explizit und daher ortsbasiert sind und eine räumliche Ausdehnung haben. Folglich müssen die Entscheidungsträger die räumliche Ausdehnung der Attribute, ihren Detaillierungsgrad und allenfalls Überlappungen mit in die Wahl ihrer Präferenzen einbeziehen. Wie in der oben beschriebenen MCDA wird durch die Anwendung von Nutzenfunktion, Gewichtung und Aggregationsmodell der Nutzen berechnet, den ein Attribut bezüglich eines (Teil-)Ziels hat – in diesem Fall jedoch räumlich-explizit für jeden Punkt im Untersuchungsgebiet.

Die räumliche Betrachtung der MCDA bedingt, dass zu deren Durchführung die Attribute als Daten mit räumlicher Ausdehnung vorliegen müssen. Malczewski (1999) erkannte, dass es auch aus computertechnischer Sicht vorteilhaft ist, dafür die Raster-Datenstruktur zu verwenden. Unter der Voraussetzung, dass sich überlagernde Rasterzellen jeweils deckungsgleich sind (d.h., die gleiche Ausdehnung, dieselbe Orientierung und denselben Mittelpunkt besitzen), eignet sich diese Datenstruktur hervorragend zur mathematischen Verrechnung von ortsbasierten Werten. Wird jedes Attribut mit einer bestimmten Werteausprägung als Raster dargestellt, können der Zellwert und die Gewichtung jedes Rasters über die mathematische Aggregationsformel mit allen Rastern verrechnet werden (siehe Beschreibung der MCDA im Abschnitt 2.3.1). Dies führt schliesslich zu einer Karte, die den Endnutzen räumlich-explizit pro Rasterzelle darstellt. Die drei folgenden Abbildungen (Abbildung 3 bis Abbildung 5) stellen das Funktionsprinzip dahinter visuell dar.

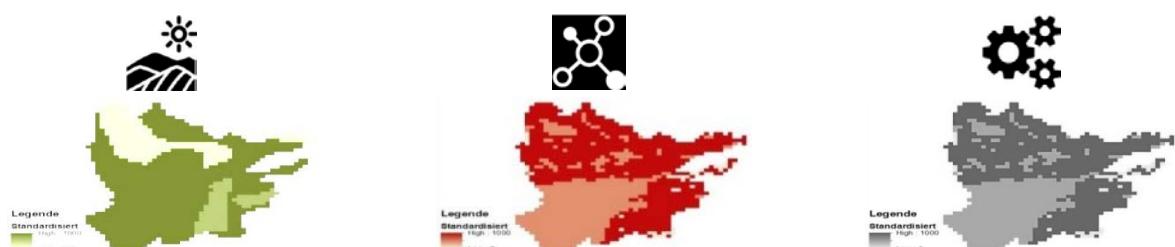


Abbildung 3: Drei Nutzenkarten im Vergleich. Dargestellt sind Auswirkungen auf die Umwelt (links, grün), Auswirkungen auf die Bevölkerung (Mitte, rot) und die technische Umsetzbarkeit eines Projekts (rechts, grau). Alle Karten haben dieselbe räumliche Ausdehnung und verwenden standardisierte Werte, die sich mathematisch verrechnen lassen.

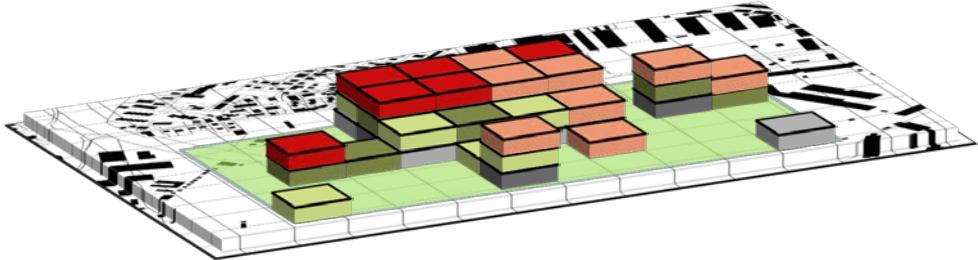


Abbildung 4: Die Werte von Abbildung 3 wurden in diesem Ausschnitt übereinander angeordnet, um zu zeigen, dass die ortsbasierten Teilnutzen (hell oder dunkel entsprechend der Ausprägungen von Abbildung 3 eingefärbt) aufaddiert werden können. Dazu werden alle Werte der drei Nutzenkarten (grün = Umwelt; rot = Bevölkerung; grau = technische Umsetzbarkeit) aufsummiert.

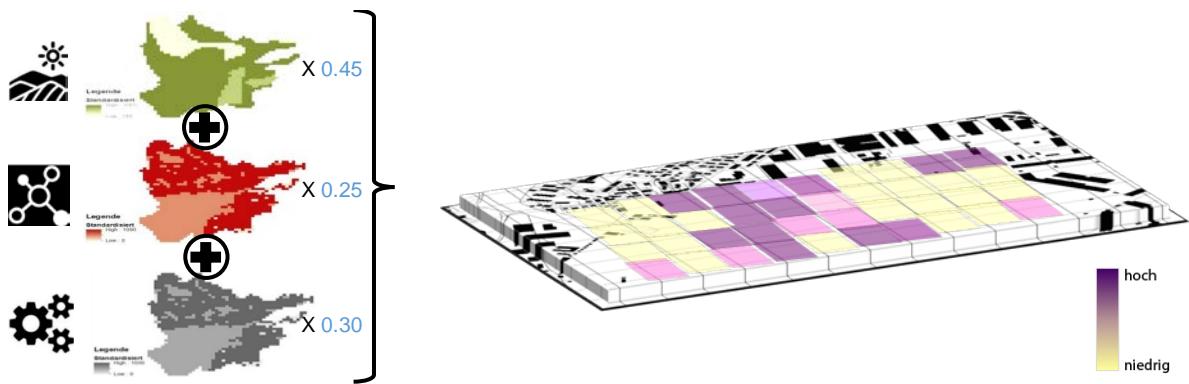


Abbildung 5: Das eigentliche Resultat berechnet sich durch die Berücksichtigung der Gewichtungen. Die Gewichtung repräsentiert die Wichtigkeit des Entscheids. Dementsprechend werden die Werte jeder Nutzenkarte mit dem Gewichtungsfaktor multipliziert, ehe sie zum Endnutzen (gelb bis violette Skala) aufsummiert werden. Als Resultat ergibt sich eine Karte, die den gewichteten Endnutzen pro Zelle wiedergibt.

2.3.2 Prinzip der Raumkosten

Die bisherigen Ausführungen fokussierten auf den *Nutzen*, der durch die Anwendung der MCDA berechnet wird. Führt man sich ein Beispiel vor Augen, bei dem der kürzeste Arbeitsweg, der höchste Lohn, das beste Arbeitsklima für die Jobwahl am nützlichsten sind, so ist es bei den *Kosten* gerade umgekehrt. Eine Strecke zwischen zwei Punkten zu passieren, generiert per se keinen Nutzen, sondern verursacht Kosten. Als *Kosten* werden hierbei nicht nur monetäre Kosten definiert, denn vielmehr können auch der Benzinverbrauch, die CO₂-Emissionen, die verbrauchten Kalorien, die aufgewendete Zeit, die Luftverschmutzung entlang der passierten Strecke, etc. für die Kostenberechnung in Betracht gezogen werden. Werden solche Indikatoren normiert, kartografisch erfasst und durch MCDA verrechnet, entsteht eine Karte, welche die ortsbasierten Raumkosten darstellt.

Aus dieser Perspektive stellt sich folglich die Frage, welche Strecke passiert werden muss, damit die geringsten Gesamtkosten entstehen. Um dies zu beantworten, wird gemäß Abbildung 5 zuerst eine

Karte erstellt, welche die relativen Kosten pro Flächeneinheit angibt (im obigen Beispiel sind die Kosten rasterförmig dargestellt und gelten somit für jeden Punkt in derselben Rasterzelle). Anschließend wird vom Startpunkt aus für jeden anderen Punkt auf der Karte berechnet, wie hoch die minimalen Kosten sein werden, um die jeweilige Zelle zu erreichen. Dieser Prozess wird nochmals wiederholt, indem der Zielpunkt als Anfangspunkt gewählt wird und alle anderen Zellen berechnet werden. Diese beiden sogenannten Kostendistanzraster werden in einem nächsten Schritt aufsummiert, was eine Karte mit den **totalen Raumkosten** zur Folge hat. Je niedriger die Raumkosten jeder Zelle sind, desto niedriger ist der Zellwiderstand und desto geeigneter ist diese Zelle hinsichtlich des definierten Problems. Die zusammenhängende Linie, die sich aus den geringsten totalen Raumkosten zwischen dem Start und dem Ziel ergibt, wird als **Least Cost Path (LCP)** definiert (Schito und Grassi 2015).

Entsprechend kann das Problem so definiert werden, dass es voneinander unabhängige Raumfaktoren gibt, die einen Widerstand gegen den Bau einer Leitung ausstrahlen. Je höher der Widerstand eines Raumfaktors (z.B. Naturschutzgebiet, Siedlungsgebiet oder Moorbiotop), desto unwahrscheinlicher ist es, dass eine Leitung dort gebaut werden kann. Um eine präzise Aussage bezüglich der Wirkung der Raumfaktoren treffen zu können, muss deren Wahl mit tatsächlichen Widerständen begründbar sein, die sich z.B. auf der Grundlage von Gesetzen ergeben (z.B. Naturschutzgebiet = NHG, Siedlungsgebiet = RPV, Moorbiotop = BV).

3 Material und Methode

3.1 Entwicklung des 3D DSS

3.1.1 Anforderungen und konzeptionelle Fragestellungen

Das Forschungsteam legte in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern folgende Anforderungen an das 3D DSS fest:

- Das angewandte Funktionsprinzip soll mit dem Sachplanverfahren (Abschnitt 2.1) kompatibel sein.
- Die konzeptionelle Vorgehensweise beim Planen von Leitungen (Abschnitt 2.2) soll berücksichtigt werden.
- Es sollen unterschiedliche, auf dem Bewertungsschema für Übertragungsleitungen basierende Faktoren bewertet und gewichtet werden können, um daraus einen optimalen Korridor zu berechnen.
- Das Studiengebiet, der Start- und Endpunkt, das Entscheidungsmodell sowie die Raumfaktoren sollen frei wählbar sein.
- Das 3D DSS soll die indikativen Baukosten berechnen können.
- Das 3D DSS soll einfach bedienbar sein.
- Das 3D DSS soll den Vergleich verschiedener Alternativen unterstützen.
- Die Resultate sollen in 3D visualisiert werden.

Um die aufgelisteten Anforderungen zu erfüllen, mussten verschiedene, grundlegende Fragen konzeptionell beantwortet werden:

- Welche Daten eignen sich als Datengrundlage für das Entscheidungsmodell?
- Wie genau müssen die Daten aufgelöst sein, um eine zuverlässige Aussage über einen Sachverhalt bzw. über ein berechnetes Resultat machen zu können?
- Wie soll das Entscheidungsmodell aufgebaut werden, um gesetzliche Rahmenbedingungen möglichst ideal abzubilden?
- Welche Mechanismen müssen angewandt werden, um das Funktionsprinzip des Sachplanverfahrens und die Vorgehensweise beim Planen von Leitungen in einen Algorithmus zu überführen?
- Welche Erkenntnisse soll ein Nutzer aus der Bedienung des 3D DSS erlangen?
- Welche Funktionen soll das 3D DSS einem Nutzer erlauben?
- Welche 3D-Visualisierungsumgebung eignet sich am besten, um die Resultate für verschiedene Nutzer anschaulich darzustellen?
- Welche Programmiersprache (inklusive deren Libraries) eignet sich am besten?
- Welche (Zwischen-)Resultate sollen berechnet werden?
- Welche Ansätze eignen sich am besten, um die (Zwischen-)Resultate zu berechnen und wissenschaftlich zu legitimieren?

Die nachfolgenden Abschnitte greifen die obigen Fragen auf und es wird erläutert, weshalb sich das Forschungsteam für bestimmte Ansätze bzw. Technologien entschieden hat.

3.1.2 Festlegung des Funktionsprinzips

Aufgrund der obigen Anforderungen wurde im Rahmen des Projekts ein 3D DSS entwickelt, welches zwischen zwei frei wählbaren Punkten geeignete Planungsgebiete, optimale Korridore und eine Auswahl geeigneter Pfade für die Erneuerung und den Neubau von Leitungen berechnet. Dabei werden sowohl Schutzzonen als auch Faktoren berücksichtigt, die einen potentiellen Einfluss auf Umwelt, Mensch und Kosten ausüben. Die resultierenden Planungsgebiete, Korridore und Pfade ergeben sich dabei aus der Verrechnung unterschiedlicher Einflussfaktoren, die jeweils einen Widerstand gegen den Bau einer Leitung ausüben. Abbildung 6 zeigt das grundsätzliche Funktionsprinzip des 3D DSS auf. In einem ersten Schritt werden für einen Betrachtungsraum relevante räumliche Faktoren (1) zu den Auswirkungen auf Raum und Umwelt sowie zu technischen Aspekten diskutiert und ihre Widerstände (2) in Bezug auf den Bau von Leitungen bestimmt. Das heisst, es wird definiert, wie geeignet z.B. Schutz- und Siedlungsgebiete oder Gebiete mit Naturgefahren für den Bau von Leitungen sind. Die Faktoren werden zusätzlich gewichtet (3). Das Tool errechnet aus diesen Vorgaben mit einer MCDA (4) eine Raumwiderstandskarte für den gesamten Betrachtungsraum. Diese dient als Basis für die anschliessende LCP-Analyse (5) zur Modellierung eines Planungsgebiets sowie eines möglichen Korridors. Zudem können für den berechneten Korridor die indikativen Baukosten angezeigt und (6) eine 3D-Visualisierung eines Trassees erzeugt werden.

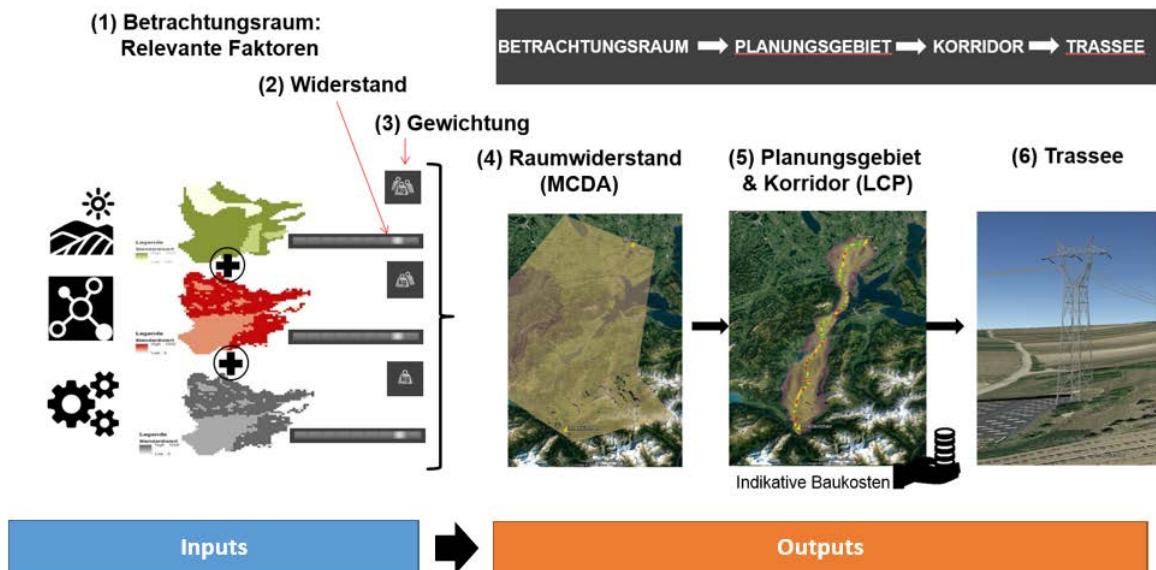


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips des 3D DSS.

3.1.3 Umsetzung des Funktionsprinzips in eine Benutzerschnittstelle

Um das erwähnte Funktionsprinzip umzusetzen und das Verfahren gemäss dem SÜL (UVEK 2001) korrekt nachzuempfinden, hat sich das Forschungsteam für die Anwendung eines Ansatzes entschieden, der das Studiengebiet kaskadisch einschränkt. Der entwickelte Ansatz vermag die ganze Prozesskette vom Studiengebiet bis zu den Mastpositionen zu durchlaufen und für jeden Schritt ein valides Teilresultat zu berechnen. Jede Komponente kann über das 3D DSS abgefragt werden, wobei teilweise unterschiedliche Einstellmöglichkeiten zur Verfügung stehen.

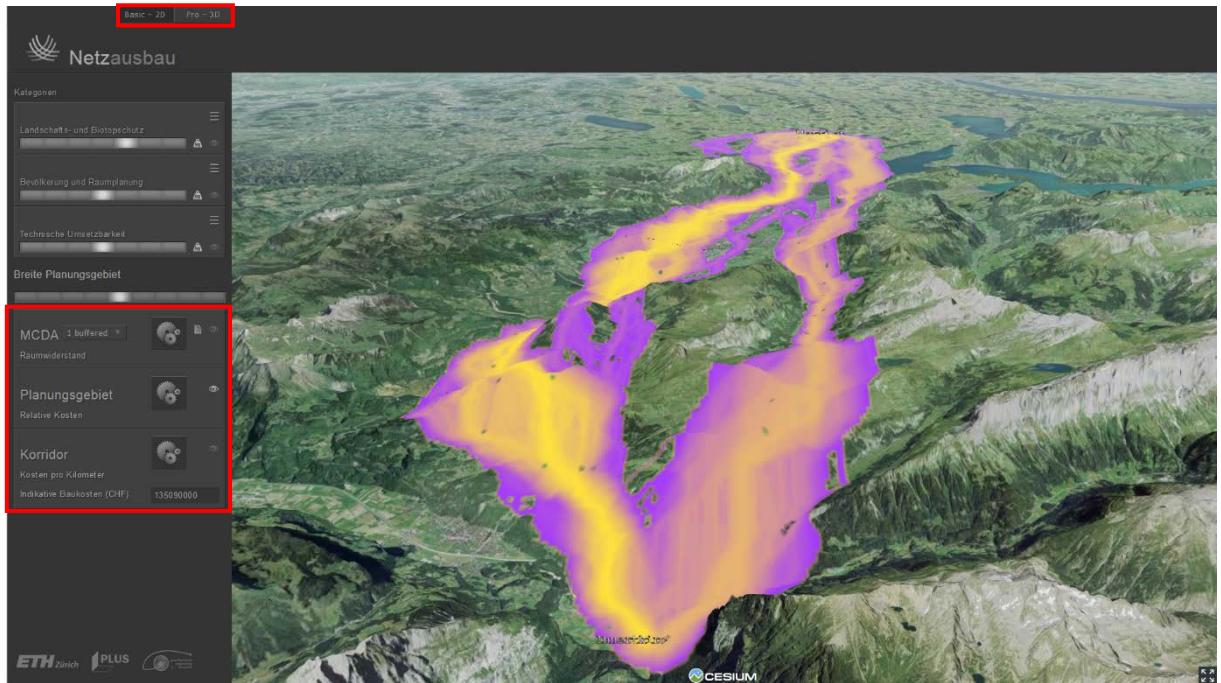


Abbildung 7: 3D DSS mit dem Planungsgebiet als Resultat einer zufälligen Einstellung. Was berechnet und angezeigt werden soll, wird über die rot umrahmten Buttons gesteuert.

3.2 Datenmodell

3.2.1 Voraussetzungen

Als Erstes wurden in Absprache mit den beteiligten Netzbetreibern die zwei Gebiete festgelegt, in welchen die beiden Fallstudien zur Modernisierung einer Leitung durchgeführt werden sollten (siehe Abschnitt 1.3.5). Zweitens wurden räumlich-explizite Faktoren eruiert, die über Gesetze so geregelt sind, dass sich diese Regelung auf irgendeine Weise auf den Bau einer Leitung auswirken kann. Für das Untersuchungsgebiet Innertkirchen – Mettlen diente das Bewertungsschema für Übertragungsleitungen (UVEK 2013) als Ausgangslage für Faktoren, die aus gesetzlicher Sicht berücksichtigt werden mussten, während für das Untersuchungsgebiet in Kärnten kein vergleichbares Dokument existierte. Da sowohl die Schweiz als auch Österreich föderalistisch organisiert sind, musste das Datenmodell fähig sein, das Prinzip der Subsidiarität und die kaskadische Hierarchie der Rechtsquellen (Mosimann und Winsky 2012) zu berücksichtigen. Entsprechend wurde festgelegt, dass die Datenmodelle in Abhängigkeit des Untersuchungsgebiets auf die zu berücksichtigenden Gesetzestexte angepasst werden müssen. Dennoch sollten die Datenmodelle vergleichbar aufgebaut werden, da in beiden Fällen die Rechtsquellen hierarchisch befolgt werden müssen (aus Staatsverträgen und der Verfassung werden Gesetze abgeleitet und davon werden Verordnungen erstellt, während kantonales Recht in der Schweiz bzw. Landesrecht in Österreich dem Bundesrecht untergeordnet ist). Sowohl in der Schweiz als auch in Österreich liessen sich die bei der Planung von Leitungen zu befolgenden Gesetze in drei Dimensionen zusammenfassen: Landschafts- und Biotopschutz, Bevölkerung und Raumplanung und technische Umsetzbarkeit.

3.2.2 Aufbau nach dem Analytical Hierarchy Process

Unter dieser Berücksichtigung wurde in mehreren Schritten und in Absprache mit diversen Bundesämtern und den Netzbetreibern das Datenmodell inklusive deren Faktoren festgelegt, die den Bau einer Leitung beeinflussen. Generell wurden in Anlehnung an das Bewertungsschema für Übertragungsleitungen (UVEK 2013) und unter Berücksichtigung der MCDA-Methode *Analytical Hierarchy Process AHP* (Saaty 1980) die in Tabelle 1 dargestellten drei Dimensionen festgelegt, die allesamt **unabhängige Variablen** darstellen:

Tabelle 1: Berücksichtigte Dimensionen, welche einen Einfluss auf das berechnete Resultat haben.

Dimension	Zweck gemäss AHP	abhängig/unabhängig	Beispiele
Landschafts- und Biotopschutz	benefits	unabhängig	Moorbiotope, BLN-Inventare, UNESCO-Gebiete, etc.
Bevölkerung und Raumplanung	benefits	unabhängig	ISOS-Inventar, Wohnzonen, Flughäfen, etc.
Technische Umsetzbarkeit	constraints	unabhängig	Mindestabstände gemäss der Leitungsverordnung, Risikogebiete, Gebiete, in denen der Bau einer Leitung technisch unmöglich ist.

Das Forschungsteam hat in Absprache mit Swissgrid die in Tabelle 2 aufgelisteten Dimensionen als **abhängige Variablen** festgelegt da beide gemäss dem *Analytical Hierarchy Process* als Kosten gelten und deshalb das Resultat nicht als unabhängige Variable beeinflussen sollten.

Tabelle 2: Dimensionen, welche als abhängige Variablen Resultate darstellen.

Dimension	Zweck gemäss AHP	abhängig/unabhängig	Beispiele
Einfluss auf Mensch und Landschaft	costs	abhängig	Länge der tangierten Schutzgebiete, Sichtbarkeit der Leitung, etc.
Indikative Baukosten	costs	abhängig	Geschätzte indikative Baukosten in CHF

3.2.3 Datenquellen

Hauptsächlich wurde auf Geodaten des Bundes, der Kantone (Schweiz) bzw. der Länder (Österreich) und der Netzbetreiber zurückgegriffen. Die Geodaten wurden auf ihre Qualität hin überprüft und in Fällen erhöhter Unsicherheit mit den zuständigen Ämtern im Hinblick auf deren Genauigkeit und Aktualität besprochen. Die Daten wurden daraufhin in einer Datenbank abgelegt und wo nötig, mit weiteren Metadaten ergänzt.

Ebenso wurde die Verwendung statistischer Daten des BFS und diverser Raumindikatoren der WSL überprüft, jedoch schliesslich verworfen, da diese durch genauere Daten oder andere Ansätze ersetzt

werden konnten. Das Einbringen von Daten über WMS (Web Map Service)-Dienste¹ zu Lasten einer zentralen Geodatenbank wurde aufgrund der längeren Abfragedauer verworfen.

3.2.4 Verwendete Faktoren

Gemäss dem SÜL sollten die verwendeten Faktoren auf dem Bewertungsschema für Übertragungsleistungen (UVEK 2013) beruhen. Aus Gründen der einfacheren Handhabung in der praktischen Entscheidungsfindung wurden ähnliche oder gestztlich nahe beieinanderliegende Faktoren zusammengefasst. Da solche Vereinfachungen aus rechtlicher Sicht heikel sind, wurden sie mit den Rechtsdiensten der zuständigen Bundesämter diskutiert und es wurde versucht, einen Abwägungsentscheid zwischen einfacher Handhabung und korrekter rechtlicher Abbildung zu finden. Diese Faktoren wurden gemäss der in Tabelle 1 aufgelisteten Dimensionen wie folgt eingeteilt:

¹ Siehe <http://www.opengeospatial.org/standards/wms> für weitere Informationen zum WMS-Standard des Open Geospatial Consortiums (OGC).

Tabelle 3: Verwendete Faktoren inkl. Beschreibung und Datengrundlage, nach Dimension gegliedert.

Dimension	Faktor	Beschreibung / Datengrundlage
Landschafts- und Biotopschutz	BLN – Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung	Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung (BLN)
	Pärke von nationaler Bedeutung	Schweizerischer Nationalpark SNP und Pärke von nationaler Bedeutung
	Auen und Amphibienlaichgebiete von nationaler Bedeutung	Auen und Amphibienlaichgebiete von nationaler Bedeutung
	Trockenwiesen und -weiden von nationaler Bedeutung	Trockenwiesen und -weiden von nationaler Bedeutung, die gem. Art. 18a NHG in einem nationalen Register eingetragen sind
	Moorbiotope von nationaler Bedeutung	Moorbiotope von nationaler Bedeutung bestehend aus Hoch- und Flachmooren (durch Art. 78 Abs. 5 BV geschützt). Objekte des Schwingraseninventars sind in diesem Datensatz ebenso enthalten.
	Moorlandschaften von nationaler Bedeutung	Moorlandschaften (durch Bundesverfassung geschützt). Objekte des Schwingraseninventars sind in diesem Datensatz ebenso enthalten.
	UNESCO-Biosphärenreservate	UNESCO-Biosphärenreservat. Im Studiengebiet die UNESCO-Biosphäre Entlebuch.
	UNESCO-Weltnaturerbe	Obwohl kein UNESCO-Weltnaturerbegebiets im Studiengebiet existiert, fließt der Faktor dennoch ins generelle Entscheidungsmodell ein
	Geotope	Erdwissenschaftlich einzigartige und didaktisch wichtige Orte, die eines besonderen Schutzes bedürfen. Quellen und Wasserfälle gemäss swissTLM3D und diverse Geotope gemäss dem Atlas der Schweiz.
	Schutzwürdige Feuchtgebiete, Laichgebiete und Fliessgewässerabschnitte mit hoher Artenvielfalt	Schutzwürdige Feuchtgebiete, Laichgebiete, Auengebiete, Auenvegetation, Fliessgewässerabschnitte mit hoher Artenvielfalt (HOTSPOT-Zonen)
	Naturschutzgebiete	Kantonal festgelegte Naturschutzgebiete, Pro-Natura-Naturschutzgebiete und Smarragdgebiete
	Wald	Bestockte Flächen
Bevölkerung und Raumplanung	Schutzgebiete nach Jagdgesetz	Zonen, in denen wild lebende Säugetiere durch das Jagdgesetz geschützt werden
	Vogelschutzzonen	Zonen, in denen insbesondere Vögel geschützt werden, inkl. Ramsargebiete
	Bundesinventar der schützenswerten Ortsbilder der Schweiz von nationaler Bedeutung (ISOS)	Ausdehnung von ISOS-Objekten mit hoher Schutzwürdigkeit = 300 m Ausdehnung von ISOS-Objekten mit geringer Schutzwürdigkeit = 50 m
	Bundesinventar der historischen Verkehrswege der Schweiz (IVS)	Die räumliche Ausdehnung wurde in Abhängigkeit ihrer Bedeutung zwischen 50 m und 150 m definiert.
	Kulturgüterschutzobjekte (KGS)	Die Ausdehnung von KGS A-Objekten wurde aufgrund ihrer höheren Bedeutung mit 300 m, die von B-Objekten mit 50 m definiert.
	Historische Areale	Historische Areale gemäss swissTLM3D
	Infrastrukturanlagen	Versorgungsbauten, Staubauten, Verkehrsareale für Motorfahrzeuge, ARAs, Deponien, Kieshalden, Kraftwerkareale, Lehmhalden und Steinbrüche gemäss swissTLM3D
	Flugplätze	Flughäfen, Flugplätze und Pisten gemäss swissTLM3D
	Gebäude	Gebäude gemäss swissTLM3D
	Öffentliche Zonen	Öffentlich zugängliche Zonen, Spitäler, Schulen, Plätze, Zentrumszonen, Zonen für öffentliche Nutzung gemäss swissTLM3D
	Wohn-, Arbeits- und Mischzonen	Wohn-, Arbeits-, Misch- und Bauzonen gemäss swissTLM3D
	Freizeitorte	Orte für den kurzfristigen Aufenthalt (OKA), an denen Menschen ihre Freizeit verbringen: Naherholungszonen, Stadtparks, Friedhöfe, Sportanlagen, Rennbahnen, etc.
Technische Umsetzbarkeit	Tourismuszonen	Tourismuszonen gemäss swissTLM3D
	Landwirtschaftszonen	Zonen, die gemäss CORINE LAND COVER (CLC2012) landwirtschaftlich genutzt werden
	Bündelung mit existierender Energieinfrastruktur	Gebiete, die mehr als 50 m von existierenden Stromleitungen entfernt sind, sodass durch ihre Bebauung die Landschaftszerschneidung begünstigt wird.
	Bündelung mit existierender Verkehrsinfrastruktur	Gebiete, die mehr als 50 m von Strassen ab 8 m Breite und Bahntrassen entfernt sind, sodass durch ihre Bebauung die Landschaftszerschneidung begünstigt wird
	Naturgefahrenzonen	Naturgefahrenzonen gemäss kantonaler Richtpläne (Überschwemmungen, Erdrutsch, Lawinen, Murgänge)
	Oberflächengewässer	Seen und Weiher gemäss swissTLM3D
	S1-Grundwasserzone	S1-Grundwasserzone: Bebauung verboten
	S2-Grundwasserzone	S2-Grundwasserzone: Bebauung unterliegt Restriktionen
	Ungeeignetes Relief	Zonen, in denen die Steigung mindestens 55° beträgt oder die Höhe über 1300 m.ü.M. liegt (Mittelwert der Höhen aller bestehender Masten in der CH plus eine Standardabweichung) und somit einen erheblichen Mehraufwand zur Bebauung erfordern.

Die Lärmimmissionsgrenzen gemäss der Lärmschutzverordnung (LSV) von 40 dbA wurden nicht in das Datenmodell eingefügt, da Tests ergeben haben, dass diese bei geeigneter Wahl des Mastbilds unter dem Anlagegrenzwert liegt.

3.3 Entscheidungsmodell

Das Entscheidungsmodell berücksichtigt die im Datenmodell festgelegten Faktoren, die den drei in Tabelle 1 aufgelisteten Dimensionen «Technische Umsetzbarkeit», «Landschafts- und Biotopschutz» und «Bevölkerung und Raumplanung» zugeordnet sind. Das Entscheidungsmodell lässt es zu, dass sowohl die drei Dimensionen als auch deren Faktoren untereinander hinsichtlich **Widerstand und Gewichtung** bewertet werden können. Dabei wurden Techniken der MCDA angewandt (siehe Abschnitt 2.3), mit denen durch die Wahl eines **MCDA-Modells** eine Formel auf die Einflussfaktoren angewendet wird, um die **Raumkosten** für ein Gebiet zu berechnen.

Gebiete mit hohen Raumkosten werden gemieden, wohingegen Gebiete mit geringen Raumkosten für den Bau einer Leitung in Frage kommen. Diese Kostenoberfläche wird anschliessend verwendet, um mit der LCP-Analyse einen geeigneten Korridor und mögliche Trassees zu berechnen.

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die Komponenten des Entscheidungsmodells etwas detaillierter.

3.3.1 Widerstände und Gewichtungen

Widerstände und Gewichtungen können im 3D DSS pro Faktor festgelegt werden. Die Gewichtung der drei Dimensionen untereinander ist möglich, wurde in der Endversion aus praktischen Gründen in der Entscheidungsfindung jedoch deaktiviert. Abbildung 8 verdeutlicht den Sachverhalt zwischen Widerständen und Gewichtungen:

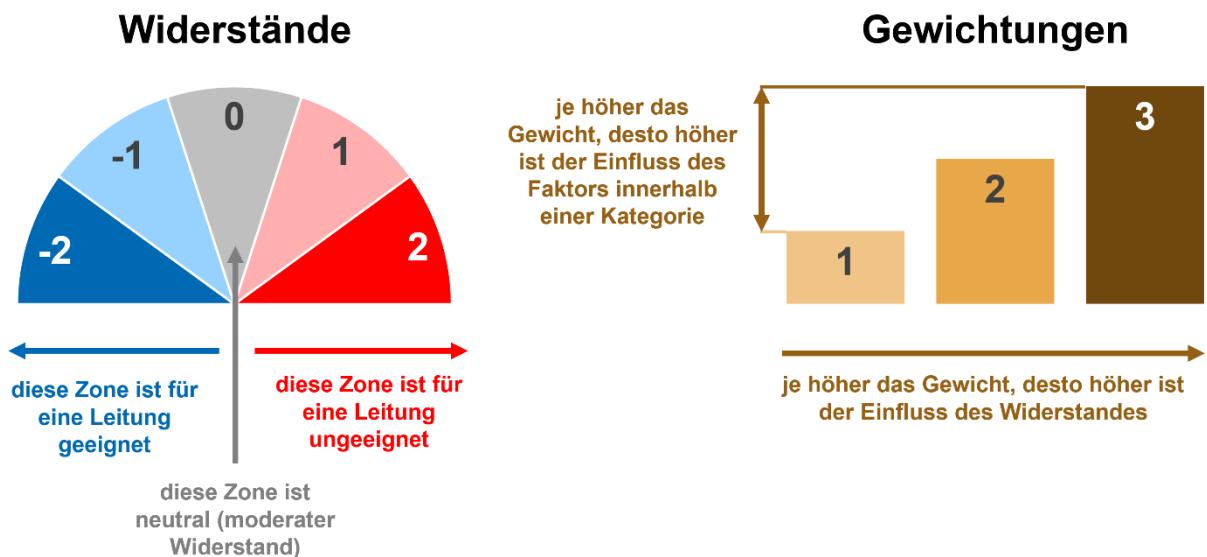


Abbildung 8: Widerstände und Gewichtungen im Vergleich.

Um die juristischen Vorgaben der Bundesverfassung, der Gesetze und der Verordnungen hierarchisch abzubilden, wurden die Faktoren hinsichtlich der Widerstände eingeschränkt. Da beispielsweise Moore und Moorlandschaften von besonderer Schönheit und gesamtschweizerischer Bedeutung

durch die Bundesverfassung geschützt sind (Art. 78 Abs. 5 BV) und daher zwangsläufig mit einem hohen Schutzwert berücksichtigt werden müssen, ist es nicht möglich, ihnen einen geringen Widerstand zuzuweisen.

Für die Verrechnung der Widerstände und Gewichtungen wurden insgesamt 13 mathematisch begründete Modelle festgelegt. Diese ergeben sich aus 3 MCDA-Modellen (Abschnitt 3.3.2) mal 2 Begrenzungsmodellen (Abschnitt 3.3.3) plus 3 Gewichtungsmodellen (Abschnitt 3.3.4) plus 4 Nutzenfunktionen (Abschnitt 3.3.4.3). Deren Einfluss auf das Resultat wurde in einer Sensitivitätsanalyse evaluiert (siehe Abschnitt 3.6 und 4.2). Die Sensitivitätsanalyse berücksichtigte nur Fälle, die logisch² sind und die Hierarchie der Rechtsquellen (Mosimann und Winsky 2012) befolgen. Beispielsweise konnte ein Moorbiotop, welches nur in einem kantonalen Inventar verzeichnet war, im Gegensatz zu einem Moorbiotop des Bundesinventars nicht mit einem höheren Widerstand oder bei gleicher Gewichtung, nicht mit einem höheren Gewicht bewertet werden.

Die Verwendung von negativen Widerständen als «begünstigende» bzw. «anziehende» Werte für den Bau einer Leitung wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern festgelegt. Es gilt festzuhalten, dass der LCP-Algorithmus nur positive Werte verrechnen kann, da Widerstände im Sinne von Distanzen verstanden werden und somit positiv sein müssen. Demnach werden die Widerstandswerte -2 bis +2 vom 3D DSS auf eine Skala von +1 bis +5 transformiert. Diese Transformation wirkt sich v.a. auf das Gewichtungsmodell aus, das im Abschnitt 3.3.4 näher erläutert wird. Der umgekehrte Ansatz, dass alle Verrechnungen immer mit dem Ausgangswertebereich -2 bis +2 getätigten werden und erst im letzten Schritt vor der Anwendung des LCP-Algorithmus in einen positiven Wertebereich transformiert werden, wurde zwar implementiert und getestet, jedoch vom Forscherteam verworfen, da die Unterschiede gegenüber dem oben beschriebenen Transformationsmodell unwesentlich waren.

3.3.2 MCDA-Modelle

Das Konzept der MCDA wurde auf Basis der auf die Umsetzung in GIS fokussierten Publikation von Malczewski (1999) erstellt. Da quantifizierbare Werte in einzelnen Datensätzen abgespeichert sind, wurde das nach Attributen unterteilte MADM (Multi-Attribute Decision Making) gewählt. Ein Szenario stellt dabei ein Setting an unterschiedlichen Gewichtungen der einzelnen Faktoren dar.

Da das Datenmodell mehrere Faktoren enthält, die unterschiedlich bewertet werden können, bedarf es einer Logik, wie die einzelnen Faktoren miteinander verrechnet werden. Dazu hat das Forscherteam drei MCDA-Modelle (siehe Abschnitt 3.3.2.1 bis 3.3.2.3) entwickelt, auf die zwei unterschiedliche Begrenzungsmodelle (siehe Abschnitt 3.3.3) angewandt werden konnten, sodass sich daraus

² Das Datenmodell wurde für die Sensitivitätsanalyse so vereinfacht, dass alle Faktoren zusammengefasst wurden, welche dasselbe Schutzziel verfolgten. Dabei wurde zwischen primären und sekundären Schutzz Zielen unterschieden. In Absprache mit den zuständigen Bundesämtern wurde festgelegt, welche Faktoren aufgrund der Gesetze wichtiger waren als andere und daher ein primäres Schutzziel verfolgten. Da der Entscheidungsträger jedem Faktor einen Widerstand zuweist und seinen Entscheid gewichtet, bedeutet ein logischer Fall, dass a) der Widerstand eines primären Schutzz Ziels immer mindestens gleich hoch wie das entsprechende sekundäre Schutzz Ziel sein muss und b) dass bei gleichen Widerständen die Gewichtung des primären Schutzz Ziels mindestens gleich hoch wie das entsprechende sekundäre Schutzz Ziel gewichtet werden muss. Nur in diesen Fällen ist gewährleistet, dass ein primäres Schutzz Ziel auch mathematischen einen höheren Einfluss auf das Gesamtresultat erzielt als das entsprechende sekundäre Schutzz Ziel.

sechs Kombinationen ergaben. Diese Kombinationen wurden an Workshops demonstriert und evaluiert. In den nächsten drei Unterabschnitten werden zuerst die drei verwendeten MCDA-Modelle erklärt. Der jeweils verwendete Term $g_i \cdot w_{ix}$ stellt hierbei eine Vereinfachung dar, was im Abschnitt 3.3.4 präzisiert wird. Nachfolgend zeigt Abbildung 9 exemplarisch, dass die Wahl der Kombination aus den drei MCDA-Modellen und den zwei Beschränkungsmodellen einen entscheidenden Einfluss auf den Verlauf des Least Cost Paths hat.

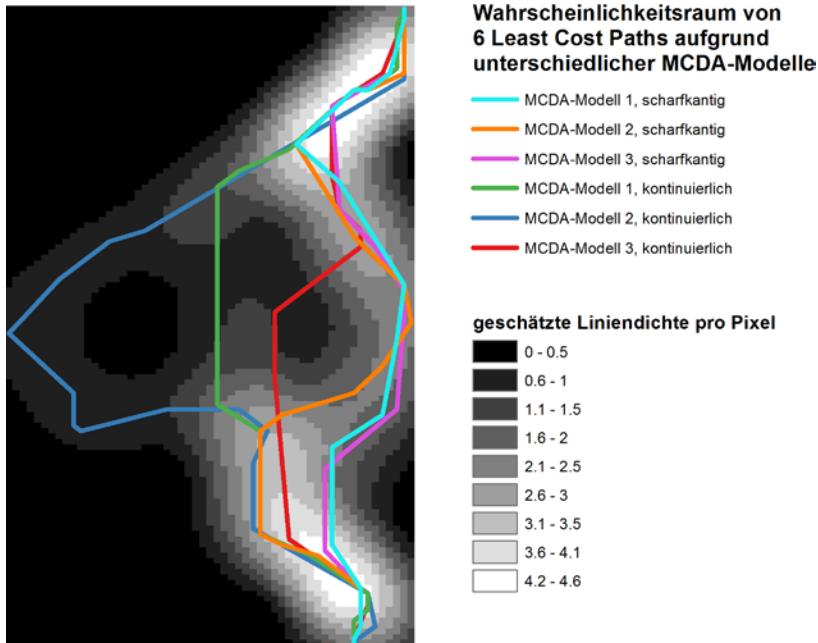


Abbildung 9: Vergleich zwischen sechs unterschiedlichen Kombinationen an MCDA- und Begrenzungsmodellen anhand der modellierten Least Cost Paths. In diesem Beispiel liegen die Least Cost Paths der scharfkantigen Modelle näher beieinander, während die kontinuierlichen Modelle zu höherer räumlicher Varianz führen. Entsprechend ist der Wahrscheinlichkeitsraum ausgeprägt, der die Liniendichte der Least Cost Paths anzeigt.

3.3.2.1 MCDA-Modell 1: Simple Additive Weighting

Simple Additive Weighting ist die einfachste, klassischste Methode der Verrechnung der totalen Raumkosten t_c (siehe Abschnitt 2.3.2). Die totalen Raumkosten pro Rasterzelle berechnen sich dabei aus der Summe der einzelnen Widerstände in Abhängigkeit ihrer Gewichtung. Das heisst, dass grundsätzlich folgende Formel angewandt wird:

$$t_1 = \sum_{i=1}^n g_i \cdot w_{i,x}$$

wobei i der jeweilige Faktor, n die Anzahl aller Faktoren, t_x der totale Raumwiderstand an der Stelle x , g_i die Gewichtung des Faktors i , und w_{ix} der Widerstand des Faktors i an der Stelle x ist. *Der sich ergebende Raumwiderstand ist das direkte Resultat der eingestellten Widerstände und Gewichtung unter Berücksichtigung aller Faktoren.*

3.3.2.2 MCDA-Modell 2: Logarithmisch bewertetes Simple Additive Weighting

Es kann vorkommen, dass sich die Zellen verschiedener Faktoren überlagern. Entweder entsteht eine Überlagerung durch Zufall oder durch einen gewollten mehrfachen Schutz. Als Beispiel dafür sei ein Moor beschrieben, das gleichzeitig noch ein Naturschutzgebiet und ein wichtiger Lebensraum für Vögel ist. Würde man einen Mehrfachschutz mit Simple Additive Weighting berechnen, ergäbe sich ein totaler Raumwiderstand durch simple Addition.

Es ist nun aber fraglich, ob der durch Simple Additive Weighting berechnete Raumwiderstand gerechtfertigt oder überbewertet ist. Ein mehrfach geschütztes Gebiet würde in diesem Fall schnell einen höheren Raumwiderstand als ein Moor erhalten, auch wenn die eigentliche Schutzwirkung dagegen tiefer wäre. Konkret: Soll ein zweifacher Schutz mathematisch einer Verdoppelung entsprechen oder ist das zu hoch angesetzt? Aufgrund dieser Überlegungen wurde eine Methode entwickelt, die mehrfachen Schutz zwar zulässt, aber umso mehr dämpft, je häufiger sich die geschützten Zellen überlagern. Dazu wird folgende Formel angewandt:

$$t_2 = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot w_{i,x}}{\ln c_x + 1} \quad \forall c_x \geq 1$$

wobei c_x die Anzahl der sich überlagernden Zellen aller n Faktoren an der Stelle x ist. Falls es Zellen gibt, deren totaler Raumwiderstand null ist, wird null beibehalten. *Der sich ergebende Raumwiderstand berücksichtigt sich überlagernde Zellen insofern, als dass er sie abschwächt, um mehrfach geschützte Gebiete gegenüber anderen nicht übermäßig zu bevorteilen.*

3.3.2.3 MCDA-Modell 3: Maximalwert

Eine dritte Methode ist es, pro Rasterzelle den Maximalwert aller sich überlagernden Faktoren auszuwählen. Der totale Raumwiderstand wird berechnet, indem pro Zelle alle Faktoren samt ihrer Gewichtung miteinander verglichen werden, wobei der Maximalwert ausgewählt wird. Dazu wird folgende Formel angewandt:

$$t_3 = \max_{i \in \{1, \dots, n\}} (g_i \cdot w_{i,x})$$

wobei i der jeweilige Faktor, n die Anzahl aller Faktoren, t_x der totale Widerstand an der Stelle x , g_i die Gewichtung des Faktors i , und $w_{i,x}$ der Widerstand des Faktors i an der Stelle x ist. *Durch die Maximalwertmethode wird bloss der höchste Widerstand samt seiner Gewichtung berücksichtigt. Mehrfachschutzeffekte, die durch Überlagerung entstehen, entfallen somit.*

3.3.3 Begrenzungsmodell der Faktoren

Nebst der Wahl des MCDA-Modells kann bei der Modellierung zwischen verschiedenen räumlichen Begrenzungsmodellen unterschieden werden. In der Abbildung 10 unten sind jeweils eine Kernzone mit dem Raumwiderstand 7 und das umliegende Gebiet mit dem Raumwiderstand 3 abgebildet. Diese Abgrenzung kann wie im Fall links trennscharf oder wie im Fall rechts kontinuierlich sein.

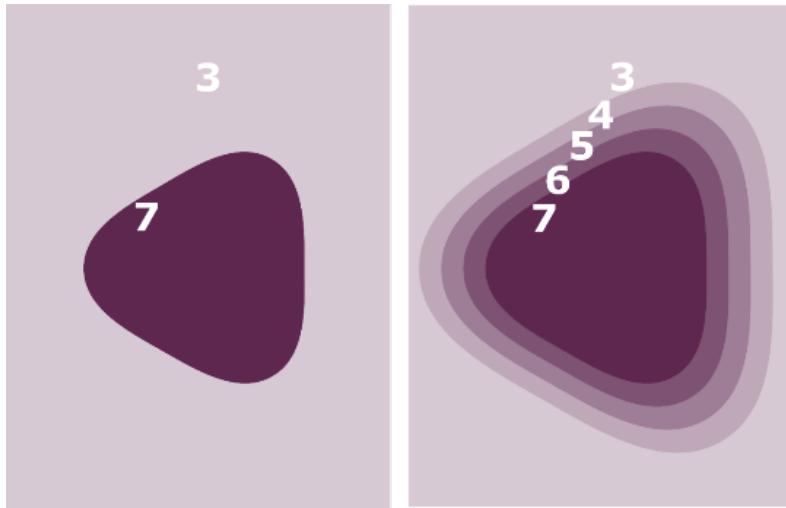


Abbildung 10: Ein scharfkantiges (links) und kontinuierliches (rechts) Begrenzungsmodell im Vergleich.

Das kontinuierliche Begrenzungsmodell bedeutet, dass ein schützenswertes Gebiet nach aussen eine (abnehmende) Schutzwürdigkeit über ihre Grenzen hinaus ausstrahlt. Geometrisch wird dieser Ansatz umgesetzt, indem um die Kernzone des schützenswerten Gebiets Pufferringe gebildet werden, in denen der Raumwiderstand nach aussen schrittweise abnimmt. Das kontinuierliche Begrenzungsmodell bezieht das Konzept der räumlichen Autokorrelation (Tobler 1970) ein, das besagt, dass räumlich verteilte Werte (ähnlich wie Zeitreihen) per se autokorriert sind.

Über welche Distanz die räumliche Autokorrelation pro Faktor wirkt und wie sie nach aussen abnimmt (linear, logarithmisch oder exponentiell), wurde im Rahmen einer Vorstudie mit zehn Experten ermittelt. Um die resultierende Distanz festzulegen, wurde pro Faktor der Median ermittelt. Die geometrische Form des Verlaufs ergab sich durch die meistgenannte Antwort, was bei allen Faktoren der lineare Verlauf war.

3.3.4 Gewichtungsmodell

Sowohl Widerstände als auch Gewichtungen werden von einem Entscheidungsträger subjektiv festgelegt. Die Gewichtung legt dabei fest, wie wichtig einem Entscheidungsträger die Erreichung eines Ziels gegenüber der Nichterreichung ist, die er sich durch die Wahl des Widerstands erhofft (siehe Abschnitt 2.3.1). Dies bedeutet, dass die Wahl des Gewichts den Widerstand in der Gesamtrechnung so beeinflussen muss, dass der beabsichtigte Effekt verstärkt wird.

Dazu wurden Gewichtungsmodelle erstellt, welche die im Abschnitt 3.3.1 eingeführten Begriffe des Widerstands und der Gewichtung aufgreifen und sie in einen mathematischen Zusammenhang setzen, der im Abschnitt 3.3.2 vereinfacht mit $g_i \cdot w_{ix}$ formuliert wurde. Diese Vereinfachung greift jedoch zu wenig weit, da es bei der Verwendung natürlicher Zahlen zu einer Unregelmäßigkeit kommen kann, wenn das Gewicht gewissermassen als Feineinstellung des Widerstands betrachtet wird. Hierzu ein Beispiel: Ein Widerstand = 1 mit einem Gewicht = 3 führt zu einem Gesamtwiderstand = 3, wohingegen ein Widerstand = 2 mit einem Gewicht = 1 einen Gesamtwiderstand = 2 hat. Für einen Entscheidungsträger, der das Gewicht dem Widerstand als untergeordnet betrachtet, mag eine solche Festlegung eigenartig erscheinen. Um dies zu verhindern, wurden drei empirisch bestimmte Gewichtungsmodelle festgelegt, die im Folgenden näher beschrieben werden. Dabei stellt $h(g)$ bzw. $h(g, w)$ die Funktion des Gewichtungsmodells dar, die entweder nur vom Gewicht g oder auch vom

(untransformierten) Anfangswiderstand w abhängt. Mathematisch ausgedrückt, wird das diskrete Gewicht g durch eine der drei Gewichtungsfunktionen $h_a(g, w)$ ersetzt, wobei im Falle von h_1 und h_2 der Term w konstant ist.

Es sei an dieser Stelle nochmals festgehalten, dass – wie im Abschnitt 3.3.1 beschrieben – der Wertebereich der Widerstände -2 bis +2, mit dem der Nutzer seine Entscheidung festlegt, aus algorithmischen Gründen auf eine Skala von +1 bis +5 transformiert wird. Dies hat zur Folge, dass Gewichte grösser als 1, die auf die Widerstände 1 und 2 angewandt werden, den resultierenden Widerstand senken müssen. Gewichte auf den ursprünglichen Widerstand = 0, was dem transformierten Widerstand = 3 entspricht, haben keinen Effekt.

3.3.4.1 Gewichtungsmodell 1: starker Effekt

Hierbei wird auf positive und negative Anfangswiderstände eine unterschiedliche Funktion angewandt, um den Effekt zu erzielen, dass negative Widerstände in ihrer Wirkung verstärkt werden müssen. Der resultierende Widerstand muss demnach kleiner als der transformierte, positive Widerstand sein. Aus diesem Grund wurden folgende Formeln angewandt:

$$\forall g \geq 0 \rightarrow h_1(g) = \sqrt[7]{g}$$

$$\forall g < 0 \rightarrow h_1(g) = \sqrt[7]{\frac{1}{g}}$$

3.3.4.2 Gewichtungsmodell 2: schwacher Effekt

Wie in der obigen Formel, nur etwas abgeschwächt, wird für das Gewichtungsmodell 2 folgende Formel angewandt:

$$\forall g \geq 0 \rightarrow h_2(g) = \sqrt[10]{g}$$

$$\forall g < 0 \rightarrow h_2(g) = \sqrt[10]{\frac{1}{g}}$$

3.3.4.3 Gewichtungsmodell 3: konstanter Wert

Die einfachste Methode addiert (wenn der Widerstand positiv ist) oder subtrahiert (wenn der Widerstand negativ ist) die Anzahl an Gewichtungen mal 0.25 an bzw. vom Widerstand. Die Funktion $sgn(w)$ ergibt dabei 1, wenn w positiv ist und -1, wenn w negativ ist.

$$h_3(g, w) = w + \frac{sgn(w) \cdot (g - 1)}{4}$$

3.3.5 Nutzenfunktion

Unter Berücksichtigung des im Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Widerstandsmodells, entscheiden die Nutzer darüber, ob ein räumlich begrenzter Faktor für den Bau einer Leitung geeignet (Abbildung 8 blau) oder ungeeignet (Abbildung 8 rot) ist. Somit stellt sich die Frage, in welchem Verhältnis die Begriffe «gut geeignet», «geeignet», «neutral», «weitgehend ungeeignet» und «ungeeignet» zueinanderstehen. Aus diesem Grund wurden die vier Nutzenfunktionen der Abbildung 11 empirisch festgelegt und implementiert. Mathematisch ausgedrückt, wird der diskrete Widerstand w durch eine der vier Nutzenfunktionen $u_b(w)$ ersetzt.

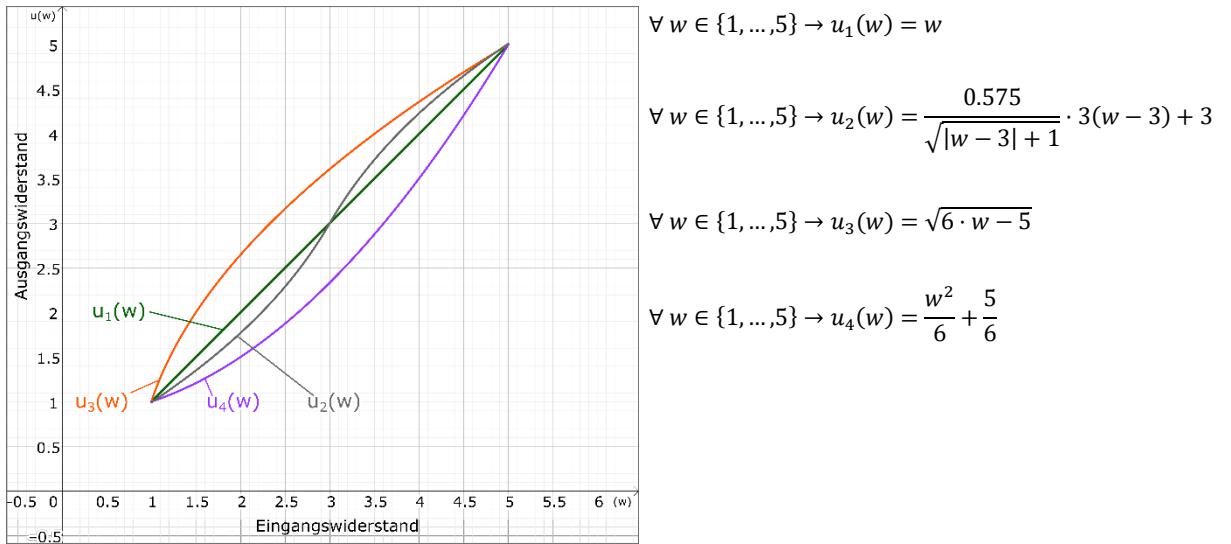


Abbildung 11: Vier empirisch festgelegte Nutzenfunktionen im Vergleich.

3.3.6 Berechnung der totalen Raumkosten

Dadurch, dass der diskrete Widerstand w durch die Nutzenfunktion u_b und das Gewicht g durch die Gewichtsfunktion h_a ersetzt wird, ändern sich die Formeln zur Berechnung der totalen Raumkosten t_c wie folgt:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= \sum_{i=1}^n g_i \cdot w_{i,x} & \rightarrow & t_1(g, w) = \sum_{i=1}^n h_{a,i}(g, w) \cdot u_{b,i,x}(w) \\
 t_2 &= \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot w_{i,x}}{\ln c_x + 1} \quad \forall c_x \geq 1 & \rightarrow & t_2(g, w) = \frac{\sum_{i=1}^n h_{a,i}(g, w) \cdot u_{b,i,x}(w)}{\ln c_x + 1} \quad \forall c_x \geq 1 \\
 t_3 &= \max_{i \in \{1, \dots, n\}} (g_i \cdot w_{i,x}) & \rightarrow & t_3(g, w) = \max_{i \in \{1, \dots, n\}} (h_{a,i}(g, w) \cdot u_{b,i,x}(w))
 \end{aligned}$$

3.4 Berechnung von Planungsgebiet, Korridor und Trassee

Für die Berechnung des Planungsgebiets, des Korridors und des Trassees wurde das von Schito und Grassi (2015) beschriebene Least Cost Path-Verfahren in der Modellierung linearer Infrastruktursysteme angewandt. Die einzelnen Schritte, die in diesem Verfahren durchlaufen werden, zeigt die folgende Abbildung (Abbildung 12).

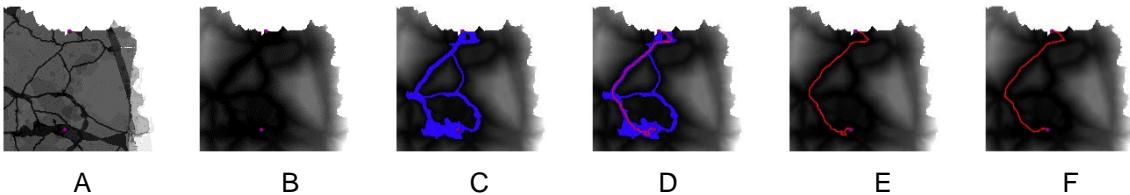


Abbildung 12: Vorgehen bei der Berechnung des Korridors und des Trassees (das Planungsgebiet wurde hier weggelassen, da bereits vorgegeben). A) Aufsummierte Raumkosten. B) Totale Raumkosten vom Start und vom Ziel zu jeder Zelle. C) Korridore. D) Korridore mit dominierender Trasseevariante. E) Dominierende Trasseevariante. F) Begradigte und optimierte Trasseevariante.

Das Verfahren wurde gewählt, weil es schnelle Berechnungen erlaubt und in der Praxis nicht zuletzt aufgrund des Raumkostenkonzepts (siehe Abschnitt 2.3.2) etabliert ist – dies obwohl sich der Least Cost Path-Algorithmus nur bedingt für die Planung von Leitungen eignet. Gründe dafür liegen in der homogenen Behandlung der drei gesetzlich inhomogenen Zustände «Mast gebaut», «Gebiet überspannt» und «Erdreich verbaut»: Beispielsweise ist ein Moorbiotop gesetzlich vor einer Verbauung geschützt, jedoch nicht (oder nur bedingt) vor einer Überspannung. In diesem Fall wäre die maximale Spannweite zwischen zwei Masten ein ausschlaggebender Faktor für die mögliche Verbauung, so lange die Masten nicht in einem Moorbiotop verbaut werden. Ein Moorbiotop demnach als komplett unpassierbar zu kennzeichnen, wäre daher inkorrekt. Deshalb bedarf das Planen von Freileitungen einer leicht angepassten Sichtweise, die dem durchgängigen Pfad im Sinne von Least Cost Path entgegensteht.

Für die Berechnung des Planungsgebiets und des Korridors wurde der Ansatz von Bevanger et al. (2014) verwendet. Dabei wird der Effekt genutzt, dass umliegende Gebiete des LCP aufgrund der räumlichen Autokorrelation meistens ähnlich teuer sind (Tobler 1970) und sich die Kosten je nach Beschaffenheit der Kostenoberfläche vom LCP aus nach aussen unterschiedlich stark erhöhen.

Dazu wird zuerst eine LCP-Analyse durchgeführt, durch die der Pfad der geringsten Kosten (= den LCP) bestimmt wird. Anschliessend wird ein Kostendach bestimmt, unterhalb dessen alle infrage kommenden Zellen zur Abgrenzung des Planungsgebiets bzw. des Korridors berücksichtigt werden. Um eine flexible Lösung für unterschiedliche Werteverteilungen verschiedener Kostenoberflächen bieten zu können, wird deshalb die **Standardabweichung** der Kostenoberfläche bestimmt und mit einem **Faktor** multipliziert, welche die Anzahl der zusätzlich zur Minimallösung (= dem LCP) infrage kommenden Zellen und somit indirekt die Breite des Planungsgebiets bzw. des Korridors reguliert. Das Kostendach berechnet sich, indem dieses Produkt der Kostensumme des LCP hinzugefügt wird. Planungsexperten definierten, dass der Faktor für ein **Planungsgebiet 0.08–0.12 Standardabweichungen** und für ein **Korridor 0.02–0.04 Standardabweichungen** umfassen soll. Der entwickelte Ansatz kann auch für das Finden des Teilraums aus dem Studiengebiet verwendet werden.

3.5 Kostenberechnung

Die Kostenberechnung ist ein zentraler Aspekt der Funktionalität des 3D DSS. Folgend wird zwischen nicht-monetären und monetären Kosten unterschieden.

3.5.1 Nicht-monetäre Kosten

Die nicht-monetären Kosten wurden einerseits durch eine Funktion modelliert, welche die Kosten berechnet, die durch das Durchqueren der Kostenoberfläche entstehen. Da diese Aufsummierung der Raumkosten von den Einstellungen des Nutzers abhängt, kann sie je nach gewählter Widerstands-/Gewichtungskonfiguration und MCDA-Modell entsprechend stark variieren. Aus diesem Grund und zu Vergleichszwecken hat sich das Forschungsteam dazu entschieden, die Kostenoberfläche zu normalisieren, sodass Varianten durch das Setzen von Schwellenwerten besser miteinander verglichen werden können. Des Weiteren wurde eine Funktion entwickelt, die berechnet, wie gross der Impact im Hinblick auf ein bestimmtes Optimierungsziel der MCDA ist (siehe dazu Abschnitt 3.6.1.2).

3.5.2 Monetäre Kosten

Die monetären Kosten wurden durch eine Funktion modelliert, die aufgrund der Reliefbeschaffenheit und des zurückgelegten Weges die ungefähren monetären Kosten approximiert. Die approximierten Kosten pro Kilometer wurden von Swissgrid zur Verfügung gestellt. Obwohl technisch möglich und im Prototyp der Masterarbeit von Nadine Piveteau (2017) erfolgreich umgesetzt, haben sich die Projektpartner bewusst gegen eine detaillierte Berechnung der Endkosten ausgesprochen. Der Grund ist, dass das 3D DSS dazu dient, das Sachplanverfahren zu unterstützen, in dem nur die geschätzten indikativen Baukosten mitberücksichtigt werden. Die indikativen Baukosten sind im Sachplanverfahren für die Wahl des idealen Korridors jedoch nicht massgebend, da es nicht das Ziel ist, die günstigste Lösung zu finden, sondern eine ganzheitliche Lösung, die den Einfluss aller Kriterien aus einer ganzheitlichen Perspektive berücksichtigt.

3.6 Sensitivitätsanalyse

Mit der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse wird der Effekt ermittelt, der sich durch einzelne Parametereinstellungen ergibt. Dabei werden die Resultate sämtlicher Parametereinstellungen berechnet und anschliessend verglichen. Der Zweck liegt darin, dominante Parameter zu erörtern, welche einen signifikanten Effekt auf das Resultat ausüben.

3.6.1 Modellanpassungen

Um die Rechenzeit für alle Parametereinstellungen zu verringern, mussten sowohl das Entscheidungs- als auch das Datenmodell vereinfacht werden. Die folgenden beiden Unterabschnitte beschreiben die Anpassungen detaillierter.

3.6.1.1 Vereinfachung des Entscheidungsmodells

Im ursprünglichen Entscheidungsmodell konnten die Nutzer sowohl ganzzahlige Widerstände (Skala: -2 bis +2) als auch ganzzahlige Gewichtungen (Skala: 1 bis 3) der 33 in der Tabelle 3 aufgelisteten Faktoren bestimmen. Im vereinfachten Modell wurden diese Skalen auf die Werte 1 (tief = für den Bau einer Leitung geeignet) und 3 (hoch = für den Bau einer Leitung ungeeignet) reduziert, um somit einen Effekt zwischen hohen und tiefen Werten feststellen zu können.

3.6.1.2 Vereinfachung des Datenmodells

Das Datenmodell wurde insofern vereinfacht, als dass die 33 in der Tabelle 3 aufgelisteten Faktoren zu 10 Faktoren zusammengefasst wurden, die durch ihren Schutz jeweils ein bestimmtes Ziel erfüllen. Sie wurden ermittelt, indem alle Teilziele unter Berücksichtigung des durch AHP definierten Zwecks (siehe dazu Tabelle 1 und Tabelle 2) in ein Zielhierarchiesystem eingeordnet wurden (Eisenführ, Weber, und Langer 2010). Tabelle 4 listet diese zusammengefassten Faktoren auf.

Tabelle 4: Vereinfachtes Datenmodell, nach AHP-Zweck gegliedert.

Constraints	Costs	Benefits
Gewährleiste die Umsetzbarkeit der Leitung	Erhöhe die Bündelung mit Leitungen, Bahnen und Strassen	Schütze den Lebensraum (primär)
Vermeide Infrastrukturanlagen	Verringere Risiken	Schütze den Lebensraum (sekundär)
		Schütze die Landschaft (primär)
		Schütze die Landschaft (sekundär)
		Schütze die Ökosysteme (primär)
		Schütze die Ökosysteme (sekundär)

Welche Faktoren zu welchem Ziel zusammengefasst wurden, ergab sich durch die Evaluation einer Expertenbefragung in einer Vorstudie. Dazu haben die befragten Experten definiert, welchem von zehn übergeordneten Zielen sie einen bestimmten Faktor zuordnen würden. Alle Gebiete, die diesem Ziel entsprachen, wurden zusammengefasst.

Die unter der Kategorie «Benefits» aufgelisteten Schutzziele sind jeweils in ein primäres und ein sekundäres Schutzziel aufgeteilt. Dies wurde so festgelegt, da die eigentlichen Abstufungen bezüglich der Wichtigkeit der zugrundeliegenden Gesetze noch viel feiner aufgeschlüsselt sind. Die Einteilung in primäre und sekundäre Schutzziele stellt deshalb eine Möglichkeit dar, die sehr komplexe Gesetzeslage in drei Schutzziele à je zwei Wichtigkeiten zu unterteilen.

3.6.2 Verwendete Faktoren

Für die Sensitivitätsanalyse wurden folgende Faktoren verwendet:

- Die Widerstände der 10 in der Tabelle 4 aufgelisteten Faktoren (1 oder 3)
- Die Gewichte der 10 in der Tabelle 4 aufgelisteten Faktoren (1 oder 3)
- Die 3 MCDA-Modelle gemäss Abschnitt 3.3.2
- Die 2 Begrenzungsmodelle gemäss Abschnitt 3.3.3
- Die 3 Gewichtungsmodelle gemäss Abschnitt 3.3.4
- Die 3 Nutzenfunktionen gemäss Abschnitt 3.3.4.3

Berücksichtigte man, dass ein sekundäres Schutzziel nicht mit einem höheren Widerstand oder bei gleich grossem Widerstand, nicht mit einem höheren Gewicht bewertet werden durfte, ergaben sich rund 3.9 Millionen Möglichkeiten.

3.6.3 Outputparameter

Als Outputparameter wurden folgende Objekte festgelegt:

- a) Optimales Planungsgebiet
- b) Optimaler Korridor
- c) Optimales Trassee
- d) Indikative Baukosten
- e) Totaler Raumwiderstand
- f) Länge der durchquerten Schutzgebiete
- g) Länge der Gebiete, die technisch heikel sind
- h) Anzahl der Masten
- i) Grösse des Planungsgebiets

Während a) und b) als Rasterkarte und c) als Vektorpfad ausgegeben wurden, stellten d) bis h) Werte dar, die als Gütemasse betrachtet und entsprechend statistisch ausgewertet werden konnten. Je kürzer dabei bei f) und g) die resultierenden Strecken waren, desto eher wurden die zugrundeliegenden Ziele erreicht.

Der Parameter i) letztlich wurde ermittelt, indem die Anzahl der Pixel, die als Planungsgebiet eruiert wurden, durch die Gesamtzahl an Pixeln geteilt wurde. Um zu analysieren, welche (zusätzlichen) Faktoren einen Einfluss auf i) haben, wurde der Faktor, der die Breite des Planungsgebiets primär kontrolliert, konstant auf 0.10 Standardabweichungen belassen (siehe Erklärung zur Funktionsweise im Abschnitt 3.4).

3.6.4 Durchführung

Zur Eruierung der Outputparameter wurden die auf dem im Abschnitt 3.1.2 beschriebene Funktionsprinzip des 3D DSS basierenden Funktionen verwendet, jedoch für den Serverbetrieb optimiert. Zusätzlich wurde eine neue Funktion implementiert, welche statistische Daten zu den Resultaten d) bis h) (Abschnitt 3.6.3) misst und diese in einer Postgres-Datenbank ablegt.

Die Jobs aller möglicher Parametereinstellungen wurden über eine Multiprocessing-Library in Python der Reihe nach aufgestellt und auf einem ETH-internen Server von 48 Cores (Intel® Xeon® CPU E5-2680 v4 @ 2.40GHz) parallel verarbeitet. Jeder Job benötigte zwischen 1 und 3 Sekunden; total dauerte die Sensitivitätsanalyse rund 8 Tage pro Studiengebiet. Es standen total rund 132 GB RAM zur Verfügung. Pro Studiengebiet wurden rund 4.0 TB an Daten und 7.5 GB an Datenbankeinträgen generiert und anschliessend ausgewertet.

Die Auswertung erfolgte, indem die Kostenoberflächen aller Karten mit einer gleichen Parameterausprägung durch die Anwendung eines gleitenden Mittelwerts (Engl.: moving average) gemittelt wurden. Nach Erhalt dieser Karten wurden davon die Outputparameter gemäss Abschnitt 3.6.3 abgeleitet und miteinander in einem R-Skript verglichen und auf eine sich allfällig ergebende Korrelation hin analysiert.

3.7 Berechnung der Mastpositionen

Im Rahmen einer Masterarbeit (Piveteau 2017) wurde ein Ansatz entwickelt, der aufgrund einer Kostenoberfläche und eines eingeschränkten Planungsgebiets ein Trassee berechnet, das aus der optimalen Platzierung der Masten resultiert. Im Gegensatz zum bisher beschriebenen Verfahren wurden bautechnische Faktoren optimiert (z.B. optimierte Mastpositionierung bei minimaler Zahl von Masten und minimalen Abspannwinkeln und mögliche Durchhängung bei gesetzlich erlaubten Immisions- und Anlagegrenzwerten).

Durch den graphenbasierten Ansatz werden alle Verbindungen zwischen allen möglichen Punkten berechnet (siehe Abbildung 13), was für ein Studiengebiet von rund 60 km Länge sehr komplex, rechenintensiv und zeitaufwendig ist. Dennoch zeigen die Resultate, dass der Ansatz die Masten optimal im Raum platziert, sodass Kosten gespart werden können und die technischen Voraussetzungen überall erfüllt sind.

Der entwickelte Ansatz wurde durch Expertenbefragung ($n = 6$) und eine Sensitivitätsanalyse validiert, indem verglichen wurde, welcher Mastpositionierungsalgorithmus welche und wie viele Schutzgebiete tatsächlich tangiert. Der optimierte Mastpositionierungsalgorithmus zeigte hinsichtlich der Trasseeführung signifikant bessere Resultate als der Ansatz, der die Position der Masten nicht optimierte. Allerdings ist der Rechenaufwand (Serverkapazität und Rechenzeit) zu gross, um diesen Ansatz in der Web-Plattform zu implementieren.

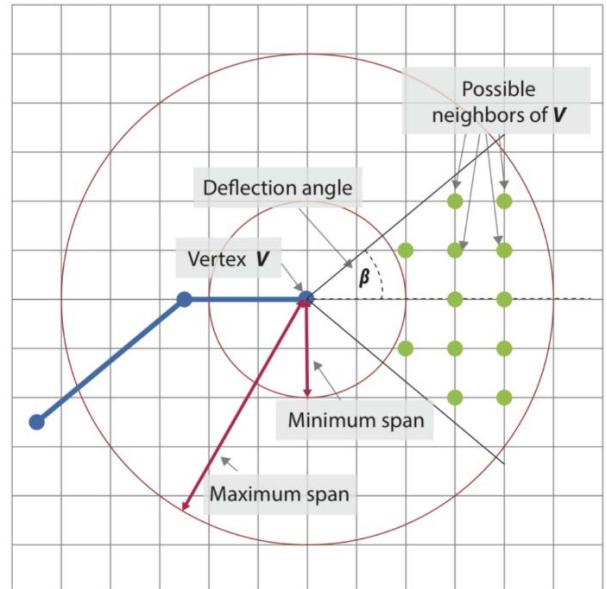


Abbildung 13: Graphenbasierter Ansatz, der nur alle möglichen Nachbarn (grün) berücksichtigt. Quelle: Piveteau (2017).

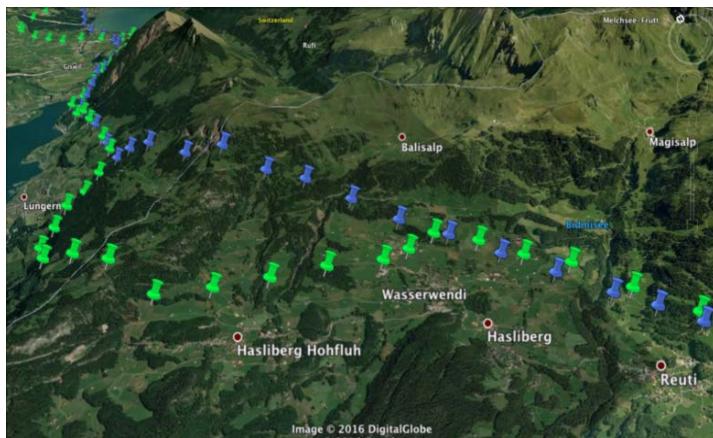


Abbildung 14: Vergleich zwischen der regulären (grün) und der optimierten (blau) Mastpositionierung. Quelle: Piveteau (2017).

Aufgrund seiner Reliabilität und des dafür gerechtfertigten Rechenaufwands ist es denkbar, dass der optimierte Mastpositionierungsalgorithmus in einer späten Phase des Sachplanverfahrens (um Korridore zu verifizieren oder um Trasseführungsalternativen zu modellieren) oder in einer frühen Phase des Plangenehmigungsverfahrens (um Mastpositionierungsalternativen zu modellieren) eingesetzt werden kann.

3.8 Sichtbarkeit der Masten

Zur Berechnung der Sichtbarkeit der Masten wurde der Ansatz von Grassi et al. (2014) implementiert. Die Funktion berechnet, wie hoch an einem Ort die potentielle visuelle Belastung wäre, falls eine Freileitung gebaut werden sollte. Eine gut exponierte Stelle, die man von verschiedenen Punkten aus sieht, würde demnach zu einer hohen potentiellen visuellen Belastung führen. Diese Sichtbarkeitsberechnung wurde in der Endversion nicht berücksichtigt, da sich einige Experten nicht einig waren, ob das Entscheidungsmodell in diesem Fall noch objektiv wäre.

3.9 Visualisierungsplattform – Architektur des 3D DSS

Die Benutzerschnittstelle und die Benutzerführung der entwickelten Visualisierungsplattform ist das Resultat mehrerer Entwicklungsschritte. Im Laufe des Projekts wurde die Funktionsweise iterativ an die Nutzerbedürfnisse angepasst. Diese wurden im Rahmen einer Nutzerstudie (Song-Zinggeler 2016) sowie an drei mit den Projektpartnern durchgeführten Anwenderworkshops im Frühjahr 2017 erfasst. Im Folgenden wird die Architektur des 3D DSS vorgestellt.

Die Visualisierungsplattform «Netzausbau» ist eine Applikation, die auf einem Web-Server (<http://netzausbau.ethz.ch>) installiert ist. Die Plattform erlaubt es, räumliche Informationen auf einem virtuellen 3D-Globus darzustellen. Zudem können durch Nutzereingaben Algorithmen (MCDA und Least Cost Path) zur Berechnung von Raumwiderständen im Betrachtungsraum sowie zur Ermittlung von Planungsgebieten und Korridoren konfiguriert und gestartet werden. Der Nutzer hat darüber hinaus die Möglichkeit, vom 2D- in den 3D-Modus zu wechseln und bestimmte Einstellungen an der 3D-Visualisierung vorzunehmen. Mehrere Sicherheitsstufen schützen sowohl die Applikation als auch die zugrundeliegenden Daten vor unzulässigem Zugriff.

Als Server wurde Ubuntu Linux gewählt. Die Programmierung der Web-Applikation erfolgte in JavaScript, basierend auf Node.js. Des Weiteren wurde die MongoDB Datenbank (<https://www.mongodb.com/what-is-mongodb>) verwendet, um die Daten zu organisieren. Alle Algorithmen wurden in Python programmiert. Es ist jedoch nicht zwingend, dass Python verwendet wird, da die Berechnungen mit den Algorithmen als externer Prozess durchgeführt werden. Das heisst, es spielt grundsätzlich keine Rolle, in welcher Programmiersprache die Algorithmen geschrieben sind. Für die aktuelle Plattform wurden zudem verschiedene JavaScript- und Python-Bibliotheken verwendet, wie gdal, rasteri, numpy und fiona.

Als Schnittstelle zwischen der Bedienoberfläche (GUI) des 3D DSS und den Algorithmen wurde ein JSON-Konfigurationsfile als zentrales Protokoll entwickelt. Dieses Protokoll erlaubt es dem Programmierer, die Nutzereingaben zur Einstellung der Faktoren im GUI, die Felder zum Starten der Algorithmen, welche diese Einstellungen verwenden, sowie die Darstellungsform der Resultate auf einfache Weise anzupassen. So läuft z. B. die Farbzueweisung zur Darstellung der Resultate in einer Karte, wie auch das Setzen und Ausrichten der Masten und Leitungen generisch ab. Dabei berücksichtigt das aufgerufene Skript technische Parameter, die auch von den Projektpartnern in der Praxis zur Planung der Leitungen verwendet werden (z. B. Durchhang der Leitungen, Masthöhe). Folgend werden die wichtigsten für die Plattform entwickelten Skripte als Übersicht aufgelistet:

- Ein Skript überprüft die zugrundeliegenden Daten, prozessiert sie für den raschen Zugriff vor und speichert sie in der Datenbank.
- Ein Skript steuert durch Anpassungen im GUI den MCDA-/LCP-Algorithmus.
- Ein weiteres Skript speichert die berechneten Resultate zur zukünftigen Verwendung in der Datenbank bzw. prüft, ob nicht bereits ein Resultat basierend auf denselben Einstellungen der Faktoren im GUI vorhanden ist. Ein bereits vorhandenes Resultat wird unmittelbar abgerufen, was die Performanz steigert.
- Ein anderes Skript fängt die berechneten Resultate ab und visualisiert die Masten und Kabel generisch, indem aufgrund der Mastpositionen die Ausrichtung der Masten und der Durchhang der Kabel berechnet werden.
- Weitere Skripts regeln die Visualisierung aufgrund der Einstellungen im GUI.
- Weitere Skripts greifen auf intermediäre Datenbanken zurück, um Hintergrundinformationen zu verlinken oder um Werte für andere Funktionen abzufragen.
- Weitere Skripts definieren die Gestaltung des GUI.
- Ein anderes Skript wertet die Resultate statistisch aus.

Als Viewer für die Visualisierung der räumlichen Informationen zu den Faktoren und der berechneten Resultate wurde der virtuelle Globus CESIUM (<https://cesiumjs.org>) in die Bedienoberfläche eingebunden. CESIUM ist eine open-source JavaScript Bibliothek für zukunftsweisende 3D-Globen. Im Gegensatz zum digitalen 3D-Globus Google Earth, können für CESIUM eigene Skripte programmiert werden, mit denen sich Daten mit unterschiedlichen Formaten auf dem Globus in 2D oder 3D darstellen lassen. Für das 3D DSS wurde so die Visualisierung der Raumwiderstandskarten, Planungsgebiete und Korridore als 2D-Karte sowie im 3D-Modus auf einem Höhenmodell mit Luftbild realisiert. Ein möglicher Trassee im berechneten Korridor wird in Form von 3D-Objekten von Masten sowie den dazwischen gespannten Leitungen visualisiert. Hierzu wurden weitere Bibliotheken wie JQuery (<https://jquery.com>), Google Elevation Service (<https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/examples/elevation-simple?hl=de>) und Geometry (<https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/geometry>) eingesetzt. Da die frei verfügbaren Standarddaten von CESIUM als Visualisierungsgrundlage insbesondere für das mögliche Trassee zu grob sind, wurde ein von Swisstopo für CESIUM aufbereitetes Höhenmodell der Schweiz (<https://codepen.io/oterra/pen/pgQgKB>) eingebunden.

Im 3D-Modus lässt sich die Position der Masten verschieben und es werden der Durchhang und der Winkel der Leitungen in Echtzeit neu berechnet und visualisiert. Als Vorbereitung für eine Weiterentwicklung des 3D DSS lässt sich für jedes Leitungssegment einstellen, ob eine Freileitung oder eine Erdverkabelung visualisiert werden soll. Per Checkbox ist es auch möglich, die Richtabstände zur Einhaltung des Anlagegrenzwerts von $1 \mu\text{T}$ in Abhängigkeit der Nennspannung räumlich darzustellen. Zudem wurde eine Down- und Upload-Funktion integriert, die es erlaubt, die Einstellung der Widerstände, der Gewichtungen und des verwendeten MCDA-Modells zu speichern und erneut zu laden. Um den Detailgrad in der Visualisierung des Ist-Zustands zu erhöhen, wurde die Darstellung von kolorierten LiDAR-Daten (LiDAR = Light Detection And Ranging) im Viewer ermöglicht. Hierzu wurde ein Skript angepasst, das die Pointclouds der LiDAR-Daten in sogenannte CESIUM 3D-Tiles umwandelt (<https://github.com/AnalyticalGraphicsInc/3d-tiles>).

4 Resultate

Der gesamte Berechnungs- und Anzeigeprozess pro Abfrage dauert für ein Gebiet von ca. 1900 km² mit einer Zellauflösung von 100 m² aktuell rund zwei Sekunden. Der entwickelte Aufbau der Web-Plattform sowie die konsequente Verwendung von Open Source Bibliotheken und eigenen Skripten stellt sicher, dass das 3D DSS für beliebige Gebiete innerhalb und ausserhalb der Schweiz in einfacher Weise angepasst und eingesetzt werden kann. In den folgenden Kapiteln werden das Design der Benutzeroberfläche sowie die Einsatzschritte und Funktionen der Web-Plattform kurz vorgestellt. Zudem werden die Resultate der Sensitivitätsanalyse, der Nutzerstudie und der Workshops mit Praxispartnern präsentiert.

4.1 3D DSS – Benutzeroberfläche, Einsatzschritte und Funktionen

4.1.1 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche gliedert sich in fünf Bereiche, in denen unterschiedliche Aktionen möglich sind. Auf der linken Seite sind die relevanten räumlichen Faktoren aufgeführt, welche für den jeweiligen Betrachtungsraum definiert und in Kategorien gegliedert wurden. Mit den Reglern und den Gewichtssymbolen werden Widerstände und Gewichtungen definiert. Darunter befindet sich der Bereich, in dem die Modellierungen zur Berechnung von Raumwiderständen, Planungsgebieten und Korridoren gestartet werden. Die Ergebnisse werden im Viewer auf der rechten Seite angezeigt. Im oberen Bereich der Webseite befinden sich Buttons zum Wechseln zwischen der Anzeige im 2D- oder im 3D-Modus. Sobald der 3D-Modus aktiviert ist, erscheinen weitere Buttons zur Veränderung der Darstellung von Inhalten im Viewer sowie zum Editieren von 3D-Objekten und Flächen.

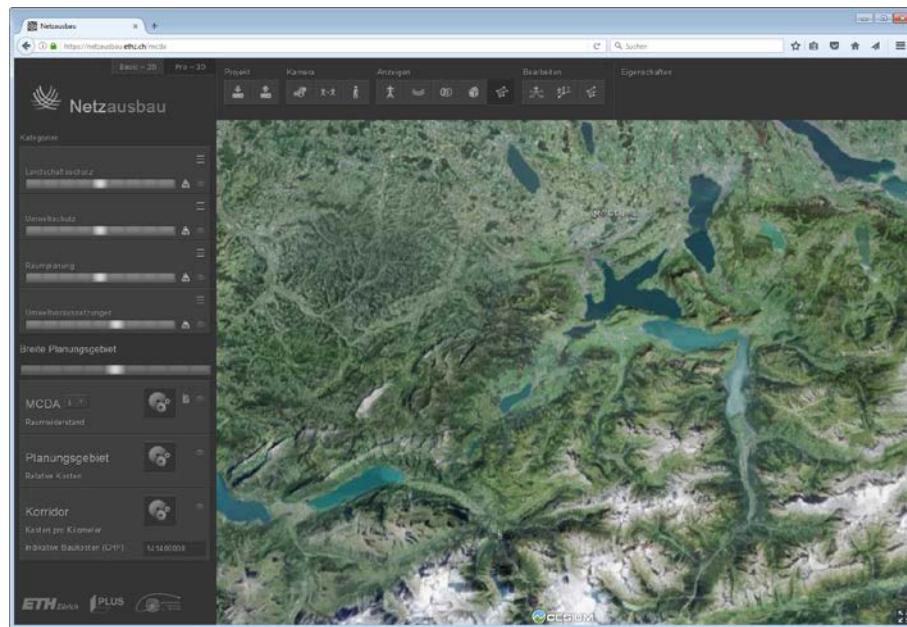


Abbildung 15: Benutzeroberfläche des 3D DSS.

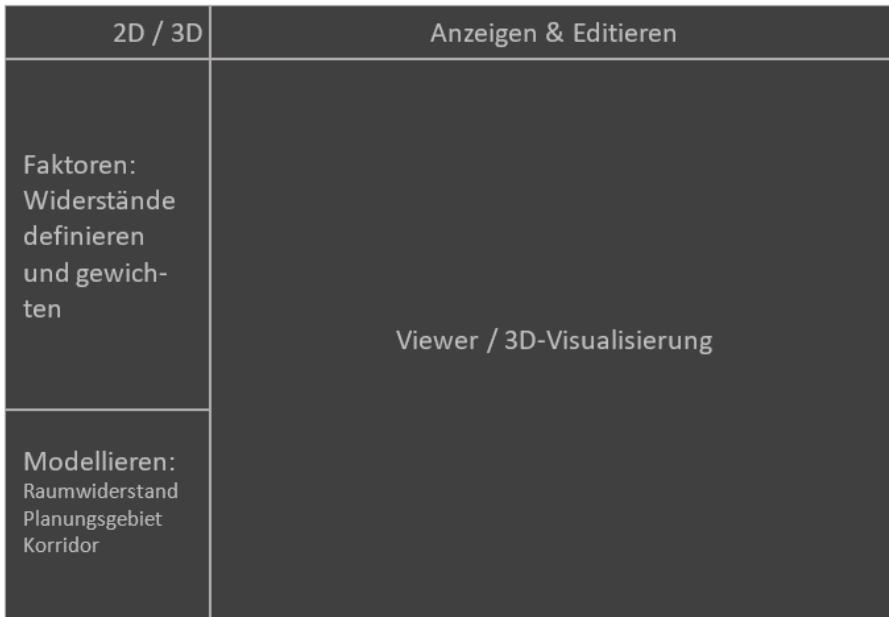


Abbildung 16: Generelles Layout des 3D DSS.

4.1.2 Widerstand der Faktoren definieren und Faktoren gewichten

Die für das betrachtete Gebiet wichtigen Faktoren sind auf der linken Seite der Benutzeroberfläche nach Kategorien zusammengestellt. Durch Klick auf das «Listen-Symbol» wird die Liste mit den einzelnen Faktoren geöffnet. Mit Klick auf das «Augen-Symbol» kann die räumliche Ausbreitung der Faktoren im Viewer (rechte Seite) angezeigt werden. Nun kann für jeden Faktor der Raumwiderstand gemäss einer Widerstandsskala (-2 bis +2) eingestellt werden. Zusätzlich können durch Klick auf das «Gewicht-Symbol» die Faktoren einfach, zweifach oder dreifach gewichtet werden.

Für die Modellierung der totalen Raumkosten wird standardmäßig das erste Gewichtungsmodell $h_1(g)$ (siehe Abschnitt 3.3.4) und die lineare Nutzenfunktion $u_1(w)$ (siehe Abschnitt 3.3.5) verwendet. Das erste Gewichtungsmodell wurde als Standard definiert, damit der Einfluss der Gewichtung in der Berechnung der totalen Raumkosten spürbar ist. Die lineare Nutzenfunktion wurde gewählt, da gleich grosse Abstände zwischen den Werten den Nutzern helfen sollen, den Effekt ihrer Entscheidung besser einzuschätzen. Eine zukünftige Version des 3D DSS könnte insofern optimiert werden, als dass die Nutzenfunktion über einen Fragekatalog, der auf einer spezifischen Abfragetechnik beruht (Eisenführ, Weber, und Langer 2010), automatisch eruiert wird.

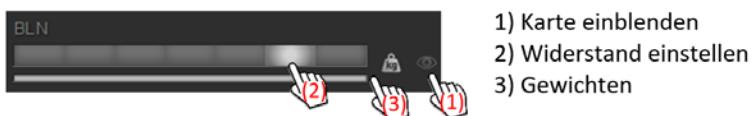


Abbildung 17: Einstellungsmöglichkeiten eines Einflussfaktors im Detail.

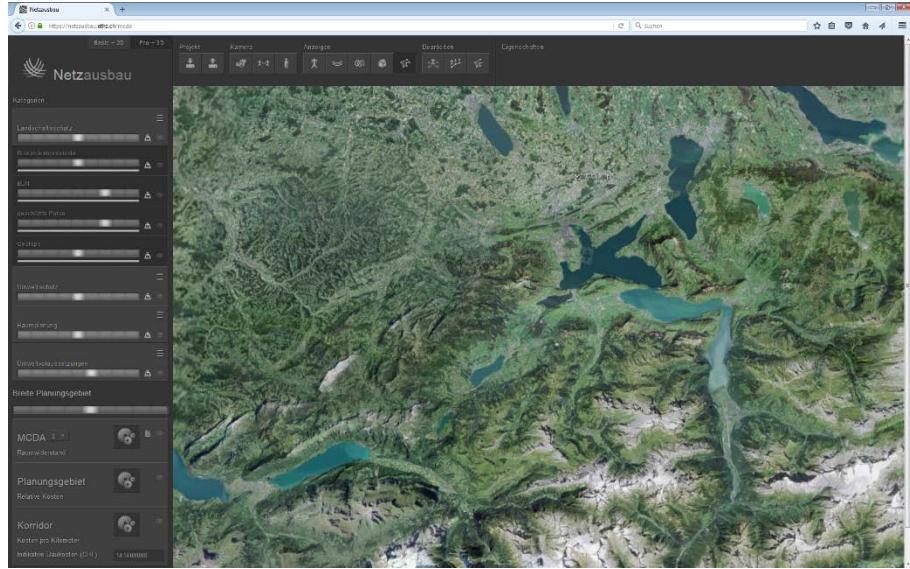


Abbildung 18: Funktionen zum Anzeigen von Faktoren sowie Definieren von Raumwiderstand und Gewichtung.

4.1.3 Raumwiderstand berechnen

Sind die Raumwiderstände und Gewichte der Faktoren definiert, kann die Berechnung der Raumwiderstandskarte erfolgen. Zuerst kann mit Klick auf den Pfeil des MCDA-Buttons ein Drop-Down-Menü geöffnet und die gewünschte MCDA-Methode ausgewählt werden. Mit anschliessendem Klick auf das Feld mit dem Zahnrad-Symbol wird die Berechnung gestartet. Das Resultat wird anschliessend im Viewer angezeigt. Die Legende lässt sich mit der Keyboard-Taste «R» ein- und ausblenden.

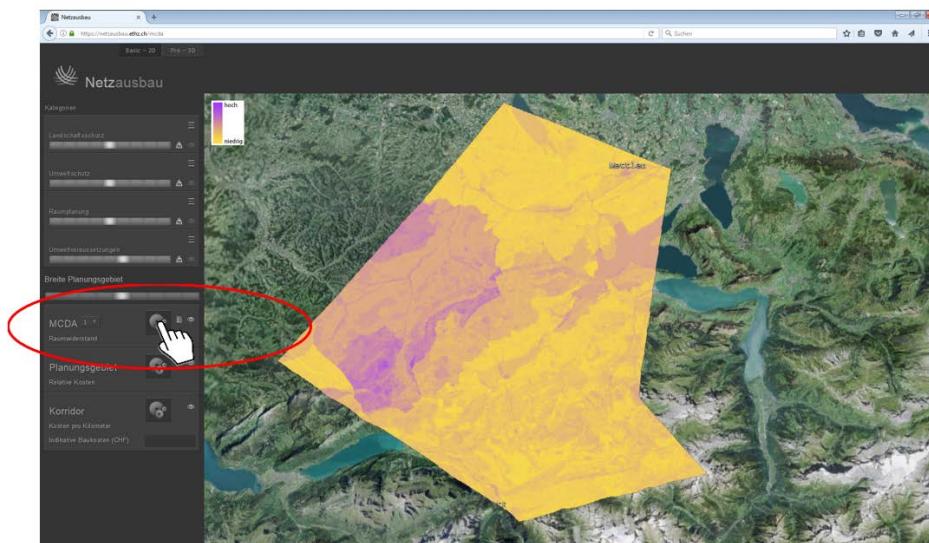


Abbildung 19: Funktion «Raumwiderstand berechnen»: Durch Klick auf das Zahnrad-Symbol wird die MCDA mit den vorher eingestellten Widerständen und Gewichtungen für die Faktoren gestartet. Im Viewer erscheint das Resultat. Gelbe Flächen weisen einen niedrigen Raumwiderstand auf, je dunkler violett die Flächen sind, desto höher der Raumwiderstand gegen den Bau von Leitungen.

4.1.4 Planungsgebiet berechnen

Mit Klick auf das Feld «Planungsgebiet» wird das Modell zur Berechnung des Planungsgebiets gestartet. Hierzu wird die Methode *Least Cost Path (LCP)* angewandt, die oben erläutert wurde. Das Ergebnis wird im Viewer angezeigt. Die Karte zeigt räumlich die relativen Raumkosten für den Bau von Leitungen auf, die sich aus dem Einbezug des Raumwiderstands aus allen Faktoren ergeben.

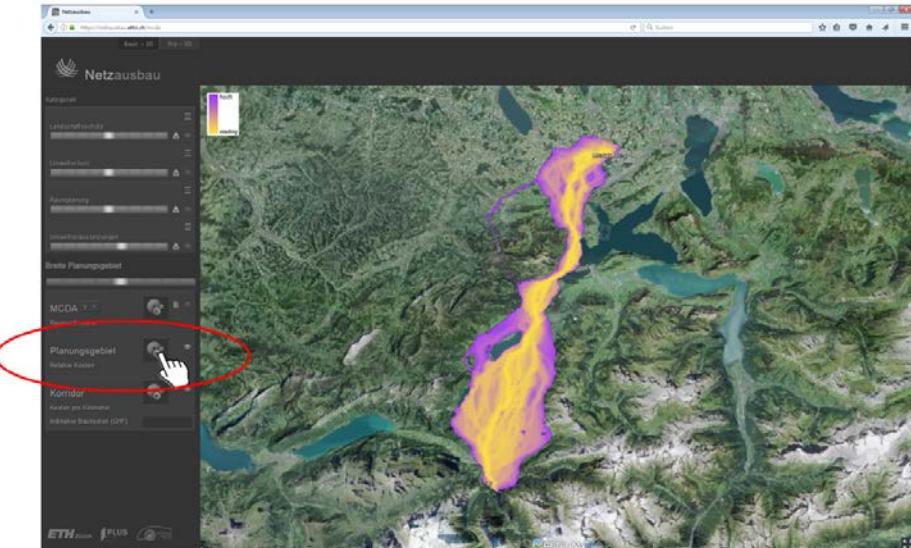


Abbildung 20: Funktion «Planungsgebiet berechnen»: Durch Klick auf das Zahnrad-Symbol wird die Least Cost Path-Berechnung gestartet. Die resultierende Karte wird im Viewer angezeigt. Je dunkler violett die Flächen sind, desto höher sind die Raumkosten zur Durchquerung der Flächen.

4.1.5 Korridor und indikative Baukosten berechnen

Der Korridor ist ein weiteres Ergebnis der «Least Cost Path»-Modellierung. Basierend auf dem Verlauf des Korridors können zudem die indikativen Baukosten abgeleitet werden. Mit einem Klick auf das Feld «Korridor» wird im bereits berechneten Planungsgebiet der optimale Korridor angezeigt, der sich aufgrund der Least Cost Path Modellierung ergibt. Für den berechneten Korridor können auch die indikativen Baukosten für einen Trasse innerhalb des Korridors als Gesamtkosten (in CHF) angegeben werden. Zudem wird der Korridor im Viewer gemäss der berechneten indikativen Baukosten pro

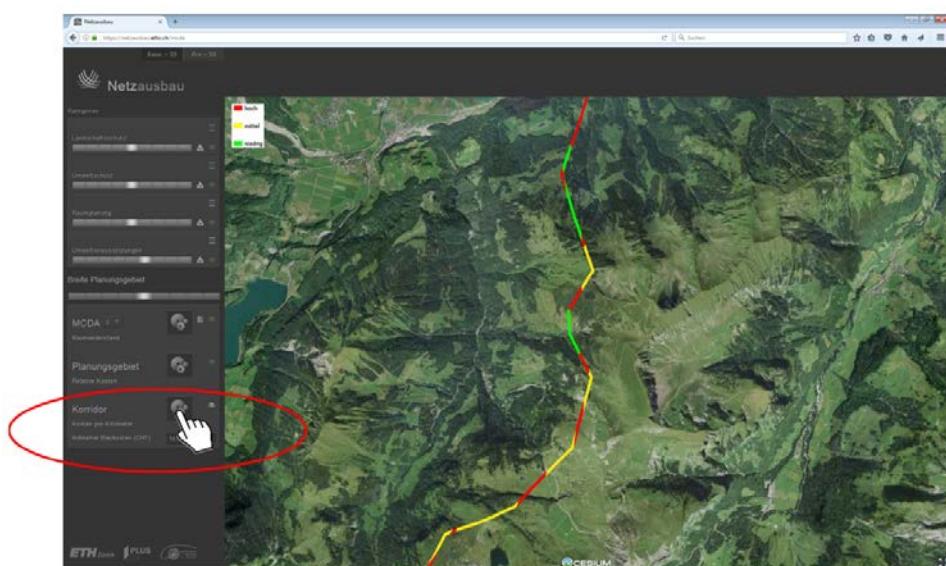


Abbildung 21: Funktion «Korridor und indikative Baukosten berechnen»: Durch Klick auf das Zahnrad-Symbol wird der Korridor (Least Cost Path) aus der vorangegangenen Berechnung im Viewer angezeigt sowie die indikativen Baukosten als Kosten pro Kilometer berechnet.

Kilometer in drei Stufen (niedrig, mittel, hoch) klassiert angezeigt. Mit der Keyboard-Taste «K» lässt sich die Legende ein- und ausblenden.

4.1.6 3D-Visualisierung eines Trassees

Durch Betätigung der Buttons «Basic - 2D» bzw. «Pro - 3D» oben links lässt sich zwischen der Kartenansicht und der 3D-Ansicht wechseln. Im 3D-Mode wird für den berechneten Korridor ein Trassee mit 3D-Objekten von Strommasten und dazwischen verlaufenden Leitungssträngen dargestellt. Zudem sind weitere Funktionen zum Anzeigen und Editieren im 3D-Mode verfügbar, die in den folgenden Kapiteln kurz vorgestellt werden.

4.1.6.1 Kamera: Leitung aus verschiedenen Perspektiven betrachten

Mit den Buttons im Bereich «Kamera» lässt sich die Perspektive von der Kartenansicht auf die räumliche Ansicht wechseln. Dabei wird mit dem mittleren Button auf die Übersicht der gesamten Leitung gezoomt, während der rechte Button eine freie Wahl der Perspektive bis in die Fußgängeransicht ermöglicht. Dazu wird im Viewer mittels Mausnavigation die gewünschte Position und Ansicht gewählt (linke Maustaste = Ansicht verschieben; rechte Maustaste/Rad drehen = Zoom; mittlere Maustaste/Rad drücken = um die Achse drehen).

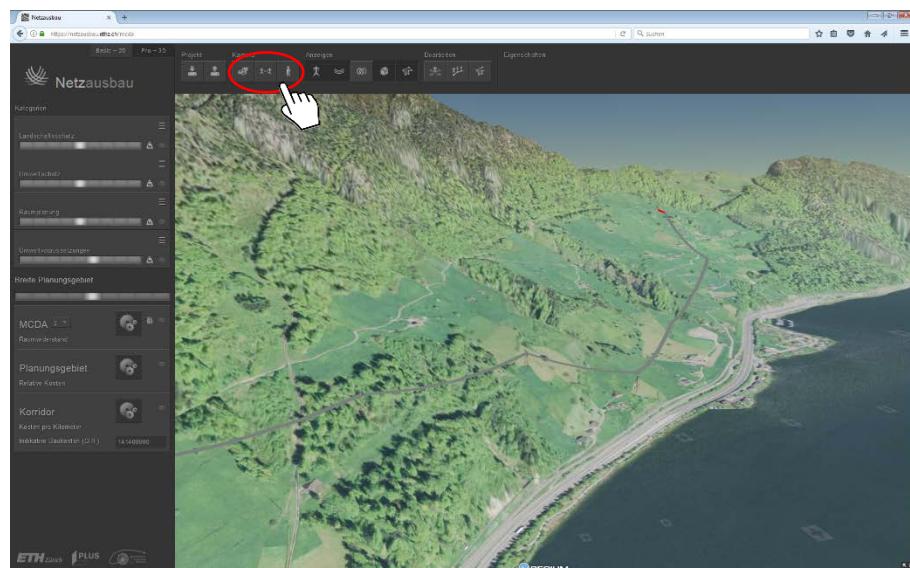


Abbildung 22: Funktion «Voreingestellte Kameraeinstellung wählen»: Durch Klicken auf eines der drei Symbole kann der Nutzer zwischen drei voreingestellten Kameraeinstellungen wählen.

4.1.6.2 Anzeigen: Strommasten, Leitungen, Abstandsbereiche, etc.

Im Bereich «Anzeigen» stehen Buttons zur Verfügung, mit denen sich die Masten und Leitungen ein- und ausblenden oder die Leitungen farblich hervorheben lassen (mehrmaliges Klicken auf den Button «Leitungen»). Zudem können nötige Abstände oder Bereiche in Form von blauen Kreisen um die Leitungen visualisiert werden.

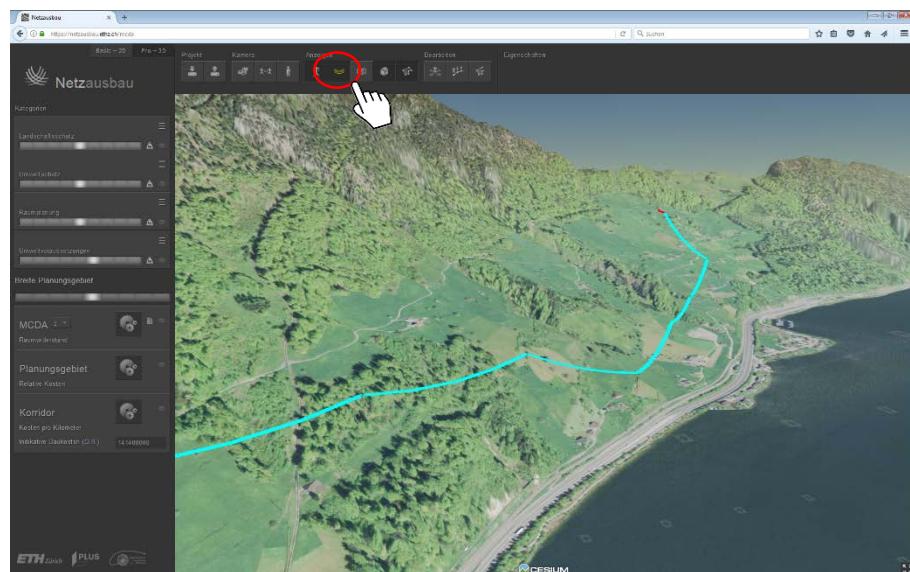


Abbildung 23: Durch mehrmaliges Klicken auf das Feld «Leitungen» werden diese blau hervorgehoben.

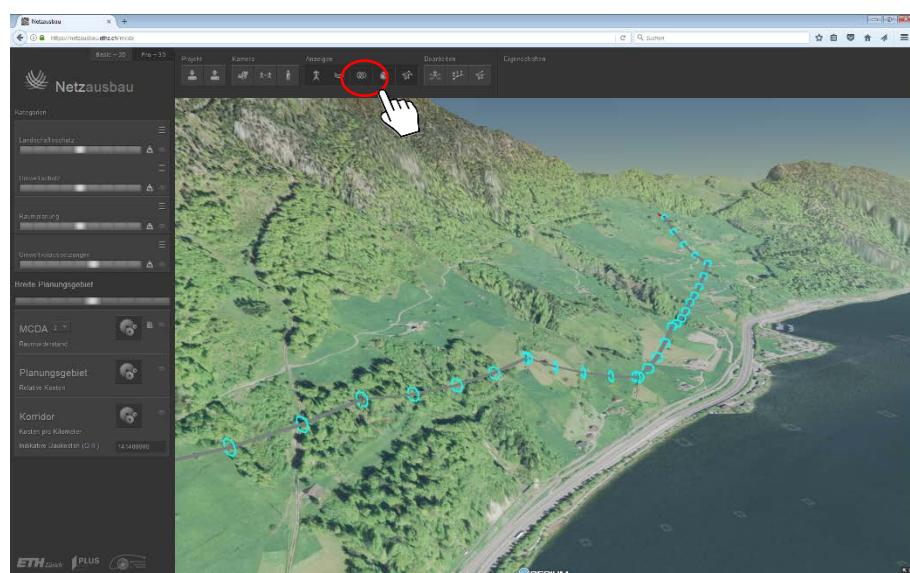


Abbildung 24: Die Richtabstände zur Einhaltung des Anlagegrenzwerts lassen sich als blaue Kreise um die Leitungen darstellen.

4.1.6.3 Bearbeiten: Masten verschieben

Im Bereich «Bearbeiten» steht ein Button zum Verschieben von Masten zur Verfügung. Wird dieser betätigt, so erscheinen Pfeile über den Masten und die 3D-Mastobjekte lassen sich mit gedrückter linker Maustaste in die gewünschte Richtung verschieben. Sobald der Mast wieder losgelassen wird, verändert sich automatisch auch der Leitungsverlauf. Wenn die Leitungen zu tief über dem Boden hängen, werden die entsprechenden Strecken rot eingefärbt. Durch Bearbeiten der Höhe des Mastes im Bereich «Eigenschaften» kann visualisiert werden, um wie viele Meter der Mast höher gesetzt werden müsste.

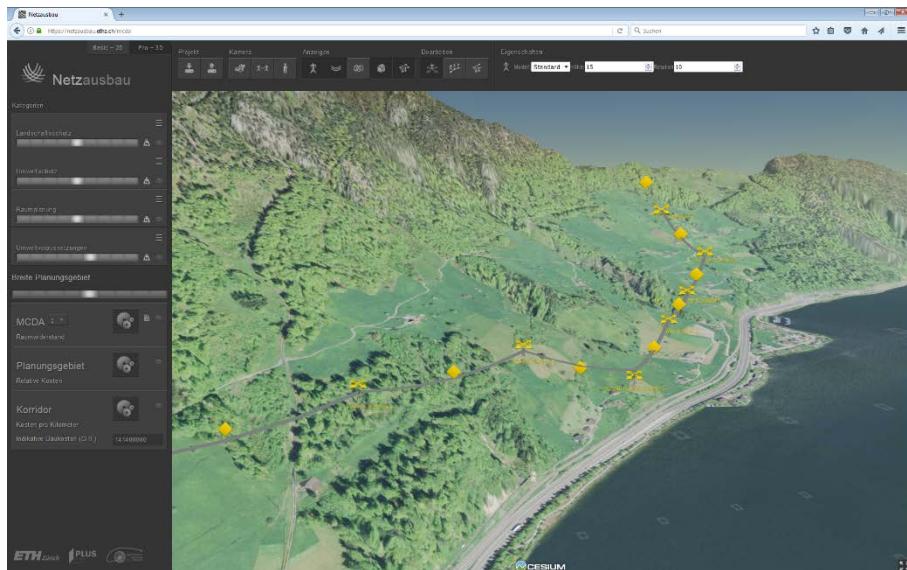


Abbildung 25: Sind die gelben Pfeile über den Masten eingeblendet, können die Masten interaktiv verschoben werden.

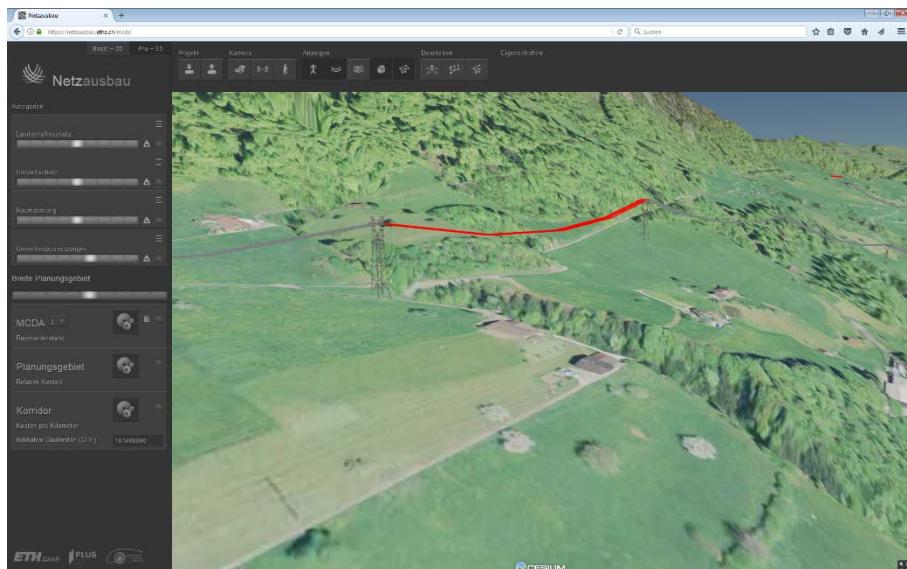


Abbildung 26: Die rot eingefärbte Leitung deutet an, dass die Leitung hier zu tief durchhängt.

4.1.6.4 Projekt: Sichern und Laden

Im Bereich «Projekt» lässt sich durch Klick auf den Button «Sichern» der visualisierte Leitungsverlauf sowie neu erzeugte Flächen in einer Datei abspeichern. Diese Datei kann mit dem Button «Laden» im 3D DSS geöffnet werden, so dass das Projekt im Viewer wieder sichtbar ist.

4.1.7 LiDAR-Daten anzeigen

Im Bereich «Anzeigen» befindet sich ein weiterer Button, mit dem sich eine Liste zum Einblenden von verfügbaren LiDAR-Daten (Pointclouds) öffnen lässt. Durch Klick auf die weissen Check-Boxen werden die jeweils gewünschten Daten im Viewer geladen. Aktuell stehen 28 LiDAR-Daten-Kacheln einer Befliegung von Swissgrid entlang einer heutigen Hochspannungsleitung zur Verfügung. Für das Anzeigen der LiDAR-Daten ist eine performante Grafikkarte erforderlich (z.B. NVIDIA GeForce GTX 1080).

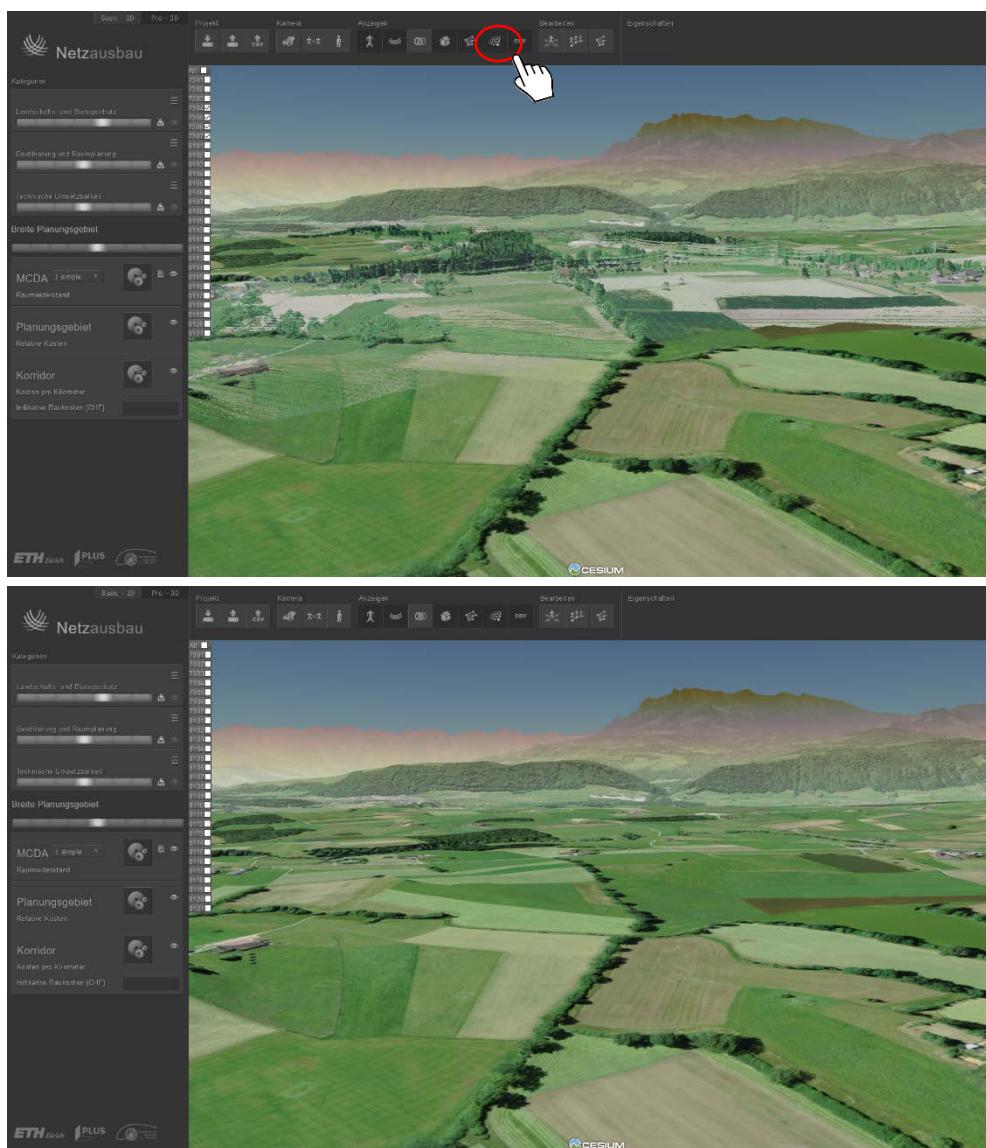


Abbildung 27: Ansichten mit eingeblendeten LiDAR-Daten (oben) und ohne (unten).

Einsatz von 3D GIS zur transparenten und nachhaltigen Planung von elektrischen Versorgungsnetzen



Abbildung 28: Ansichten mit eingeblendeten LiDAR-Daten (oben) und ohne (unten).

4.2 Evaluation der Sensitivitätsanalyse

4.2.1 Mehrfaktorielle Varianzanalyse

Um zu ermitteln, ob die unabhängigen Variablen des Entscheidungsmodells (MCDA-Modell, Begrenzungsmodell, Gewichtungsmodell, Nutzenfunktion, alle in den Abschnitten 3.3.2–3.3.4.3 beschrieben) einen Einfluss auf die abhängigen Variablen (Parameter a)–i), alle im Abschnitt 3.6.3 beschrieben haben, wurde für jede unabhängige Variable eine mehrfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Im Sinne einer multiplen linearen Regression lässt sich die Regressionsgleichung wie folgt schreiben:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_{i,1} + \beta_2 \cdot X_{i,2} + \beta_3 \cdot X_{i,3}$$

wobei die Regressoren X_1 die MCDA-Methode inklusive dem Begrenzungsmodell (total 6 Modelle), X_2 das Gewichtungsmodell (total 3 Modelle) und X_3 die Nutzenfunktion (total 4 Funktionen) darstellen. Die Regressionsparameter β_1 , β_2 und β_3 geben an, wie gross der Einfluss auf das Signal Y_i wäre, wenn ihr entsprechendes X_i um eine Einheit grösser wäre.

Die Varianzanalyse testet nach folgender Nullhypothese H_0 : «Es besteht kein Unterschied in den Ausprägungen zwischen den gewählten Faktoren». Fällt das Resultat der Varianzanalyse über dem Signifikanzniveau $\alpha=.05$ aus, wurde die Nullhypothese angenommen, d.h., dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Ausprägungen der Faktoren bestand. Lag das Resultat jedoch unter dem Signifikanzniveau, wurde die Nullhypothese verworfen und eine Post-Hoc-Analyse durchgeführt, um zu ermitteln, zwischen welchen Faktorstufen ein signifikanter Unterschied besteht. Dabei wurde die Tukey-HSD-Korrektur angewandt, um das Risiko eines Fehlers 1. Art zu minimieren. Im Studiengebiet Innertkirchen – Mettlen wurden $n = 3'871'389$ gültige Realisierungen erstellt und ausgewertet, während sich im Studiengebiet Kärnten $n = 3'190'344$ Realisierungen als gültig darstellten.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse näher beschrieben.

4.2.1.1 Untersuchung der Grösse des Planungsgebiets

Die Grösse des resultierenden Planungsgebiets wurde im Abschnitt 3.6.3 als Parameter i) definiert. Dabei wurde der Wert, der die Breite des Planungsgebiets massgeblich bestimmt, konstant belassen, um zu ermitteln, ob andere Faktoren einen Einfluss auf die Breite des Planungsgebiets haben. Das Resultat war nichtsignifikant, sodass H_0 beibehalten werden musste. Die Breite des Planungsgebiets wird somit nur über die Reglereinstellung durch den Nutzer, nicht aber durch andere Faktoren signifikant beeinflusst.

4.2.1.2 Untersuchung des Einflusses der MCDA-Methode und des Begrenzungsmodells

Für jedes im Abschnitt 3.6.1.2 festgelegte Ziel wurde getestet, welche Faktorstufen der 3 MCDA-Methoden gekoppelt an 2 Begrenzungsmodelle (insgesamt 6 Modelle) einen signifikanten Unterschied in den Resultaten bewirken. Es konnte festgestellt werden, dass auf die meisten abhängigen Variablen bezogen, signifikante Unterschiede bei der Wahl der MCDA-Methode bestehen. In insgesamt 7 Fällen war der Unterschied zwischen den MCDA-Modellen 1 und 2 jedoch nicht signifikant, wobei in 4 Fällen das scharfkantige Begrenzungsmodell und in 3 Fällen das kontinuierliche Begrenzungsmodell gewählt wurde. Das Forscherteam folgert daraus, dass die Wahrscheinlichkeit, dass Unterschiede

nichtsignifikant sind, bei der Wahl der MCDA-Methode grösser sind, als bei der Wahl des Begrenzungsmodells. Welche abhängige Variable dabei einen nichtsignifikanten Effekt erlitt, folgte nicht einem systematischen Muster. Möglicherweise hängen nichtsignifikante Effekte auch von der Wahl des Studiengebiets und der Geodaten ab, zumal 6 der 7 Fälle im Studiengebiet Kärnten lagen. Die Unterschiede zum MCDA-Modell 3 waren in jedem Fall signifikant. Es konnte jedoch nachgewiesen werden, dass die Wahl des MCDA-Modells 3 zu tendenziell geradlinigen Trassees führt, die geringe monetäre Kosten verursachen (siehe Tabelle 5 und Tabelle 6). Allerdings werden dadurch signifikant mehr Schutzzonen tangiert und niedrigere Umsetzbarkeitswerte erreicht als bei der Wahl anderer MCDA-Modelle. Die Analyse derselben Tabelle ergibt zudem, dass Modelle, welche das kontinuierliche Begrenzungsmodell abbildeten, signifikant am wenigsten Schutzgebiete und Wohnzonen tangierten.

Tabelle 5: Die Werte geben an, wie viele Prozent der gemittelten Gesamtlänge der Leitung in einem Gebiet liegen, die das entsprechende (Schutz-)Ziel verletzen. Studiengebiet: Innertkirchen – Mettlen.

MCDA-Methode	1 scharf	1 kont.	2 scharf	2 kont.	3 scharf	3 kont.
schütze Landschaft primär	0%	0%	0%	0%	0%	0%
schütze Landschaft sekundär	36%	21%	36%	20%	35%	29%
schütze Lebensraum primär	13%	8%	13%	8%	15%	13%
schütze Lebensraum sekundär	29%	20%	28%	19%	34%	32%
schütze Ökosysteme primär	13%	16%	13%	16%	16%	17%
schütze Ökosysteme sekundär	39%	41%	40%	41%	37%	41%
vermeide Infrastrukturanlagen	2%	1%	2%	1%	1%	1%
gewährleiste Umsetzbarkeit	14%	33%	12%	34%	22%	27%
erhöhe Bündelung	87%	93%	89%	94%	87%	89%
verringere Risiken	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabelle 6: Die Werte geben an, wie viele Prozent der gemittelten Gesamtlänge der Leitung in einem Gebiet liegen, die das entsprechende (Schutz-)Ziel verletzen. Studiengebiet: Kärnten.

MCDA-Methode	1 scharf	1 kont.	2 scharf	2 kont.	3 scharf	3 kont.
schütze Landschaft primär	0%	0%	0%	0%	0%	0%
schütze Landschaft sekundär	57%	49%	58%	49%	51%	51%
schütze Lebensraum primär	9%	7%	9%	7%	8%	7%
schütze Lebensraum sekundär	2%	2%	2%	2%	2%	3%
schütze Ökosysteme primär	2%	2%	1%	2%	2%	2%
schütze Ökosysteme sekundär	34%	43%	34%	43%	39%	40%
vermeide Infrastrukturanlagen	0%	0%	0%	0%	0%	0%
gewährleiste Umsetzbarkeit	2%	2%	1%	2%	4%	3%
erhöhe Bündelung	9%	31%	8%	31%	20%	30%
verringere Risiken	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Die Auswertung von Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigt zudem, dass Gebiete der entsprechenden Schutzziele «schütze Landschaft primär», «vermeide Infrastrukturanlagen» und «verringere Risiken» in beiden Studiengebieten sehr selten durchquert werden. In Gebieten mit den Schutzz Zielen «schütze Lebensraum sekundär», «schütze Ökosysteme primär», «gewährleiste Umsetzbarkeit» und «erhöhe Bündelung» unterscheiden sich die Resultate zwischen den Studiengebieten jedoch massgeblich von einander. Diese Ergebnisse interpretiert das Forscherteam als direkte Folge der unterschiedlichen Datenmodelle. Dementsprechend empfiehlt das Forscherteam, bei der Festlegung des Datenmodells sorgfältig vorzugehen und zu diskutieren, ob Gebiete, die ein ähnliches (Schutz-)Ziel verfolgen, allenfalls vereint werden können.

4.2.1.3 Untersuchung des Einflusses des Gewichtungsmodells und der Nutzenfunktion

Ebenso wurde der Einfluss des Gewichtungsmodells untersucht. Es zeigte sich einzig im Studiengebiet Kärnten ein Fall, bei dem der Einfluss des Gewichtungsmodells nichtsignifikant war. Folglich erachtet das Forschungsteam die Wahl des Gewichtungsmodells als massgebenden Faktor an, der einen entscheidenden Einfluss auf das Erreichen der gesetzten Ziele und somit auf die Lage des Korridors und den Verlauf des Trassees hat.

Die Analyse der Nutzenfunktion fiel heterogener aus. Im Studiengebiet Kärnten wurden 6 Fälle registriert, in denen der Einfluss der Nutzenfunktion nicht signifikant war. Der nichtsignifikante Einfluss auf den Zielparameter war dabei immer räumlich. Im Gebiet Innertkirchen – Mettlen hingegen wurde nur ein solcher Fall registriert. Nichtsignifikant waren die Unterschiede vor allem zwischen den Nutzenfunktionen 1 und 4, aber auch zwischen den Funktionen 1 und 3 resp. 3 und 4.

4.2.2 Korrelationsanalyse

Das im Abschnitt 3.6 beschriebene Verfahren zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse erzeugte unter anderem die im Abschnitt 3.6.3 beschriebenen Rasterdateien a) und b), welche die Kostenoberfläche und den Korridor darstellen. Auf dieser Basis wurde analysiert, ob und in welchem Ausmass sich die durch den laufenden Mittelwert (Engl: «moving average») ergebenen Karten jeder Sensitivitätsausprägung ähneln. Liessen sich systematische Korrelationen nachweisen, könnte man den Parametrisierungshorizont einschränken und den Fokus während der Entscheidungsfindung auf andere Parameter legen, die zu einer differenzierteren Ausprägung des Resultats führen würden.

Aus diesem Grund wurden alle resultierenden 13 Raster kreuzweise querverglichen, indem Pearson's Korrelationskoeffizient für jedes Paar bestimmt wurde. Die Resultate dieser Analyse werden im Folgenden in der Tabelle 7 und der Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 7: Pearson's R Korrelationskoeffizienten zwischen den gemittelten Karten der jeweiligen Ausprägung für das Studiengebiet Innertkirchen – Mettlen. M = MCDA-Modell, s = scharfkantig, k = kontinuierlich, N = Nutzenfunktion, G = Gewichtungsmodell. Hellblau eingefärbt sind Wechselwirkungen mit mittlerer Korrelation, während Relationen mit hoher Korrelation dunkelblau hinterlegt sind.

	M_1_s	M_1_k	M_2_s	M_2_k	M_3_s	M_3_k	N_1	N_2	N_3	N_4	G_1	G_2	G_3
M_1_s	1.00	0.13	0.16	-0.08	0.29	0.15	0.04	0.12	0.33	0.49	-0.01	0.26	0.52
M_1_k		1.00	-0.06	0.29	0.16	0.15	0.26	-0.09	0.35	0.15	0.12	0.39	0.50
M_2_s			1.00	0.08	0.32	-0.11	0.52	0.44	-0.15	0.28	0.42	-0.11	-0.33
M_2_k				1.00	-0.12	0.24	0.53	0.15	0.36	-0.14	0.70	0.69	0.53
M_3_s					1.00	0.00	0.00	0.01	0.09	0.56	-0.32	-0.03	0.25
M_3_k						1.00	0.34	0.06	0.80	0.00	0.18	0.29	0.34
N_1							1.00	0.04	0.50	0.04	0.44	0.49	0.66
N_2								1.00	-0.07	0.08	0.44	0.05	-0.44
N_3									1.00	0.08	0.14	0.51	0.59
N_4										1.00	-0.26	0.00	0.50
G_1											1.00	0.37	0.04
G_2												1.00	0.61
G_3													1.00

Tabelle 8: Pearson's R Korrelationskoeffizienten zwischen den gemittelten Karten der jeweiligen Ausprägung für das Studiengebiet Kärnten. M = MCDA-Modell, s = scharfkantig, k = kontinuierlich, N = Nutzenfunktion, G = Gewichtungsmodell. Hellblau eingefärbt sind Wechselwirkungen mit mittlerer Korrelation, während Relationen mit hoher Korrelation dunkelblau hinterlegt sind.

	M_1_s	M_1_k	M_2_s	M_2_k	M_3_s	M_3_k	N_1	N_2	N_3	N_4	G_1	G_2	G_3
M_1_s	1.00	0.38	0.78	0.15	0.83	0.39	0.58	0.32	0.13	0.50	0.49	0.28	0.15
M_1_k		1.00	0.42	0.32	0.42	0.29	0.68	0.34	0.29	0.72	0.49	0.22	0.42
M_2_s			1.00	0.17	0.59	0.14	0.65	0.20	0.10	0.68	0.37	0.16	0.30
M_2_k				1.00	0.06	-0.03	0.38	0.00	0.62	0.41	0.15	0.06	0.63
M_3_s					1.00	0.65	0.63	0.47	0.16	0.50	0.50	0.39	-0.08
M_3_k						1.00	0.32	0.66	0.13	0.25	0.62	0.60	-0.16
N_1							1.00	0.32	0.37	0.74	0.44	0.29	0.44
N_2								1.00	-0.20	0.31	0.68	0.84	-0.15
N_3									1.00	0.28	-0.02	-0.17	0.63
N_4										1.00	0.56	0.25	0.39
G_1											1.00	0.65	-0.06
G_2												1.00	-0.15
G_3													1.00

Vergleicht man Tabelle 7 und Tabelle 8 miteinander, so lässt sich kein deutliches Korrelationsmuster zwischen den beiden Studiengebieten erkennen. Ausserdem liegen in Kärnten die Korrelationskoeffizienten etwas höher als in Innertkirchen – Mettlen.

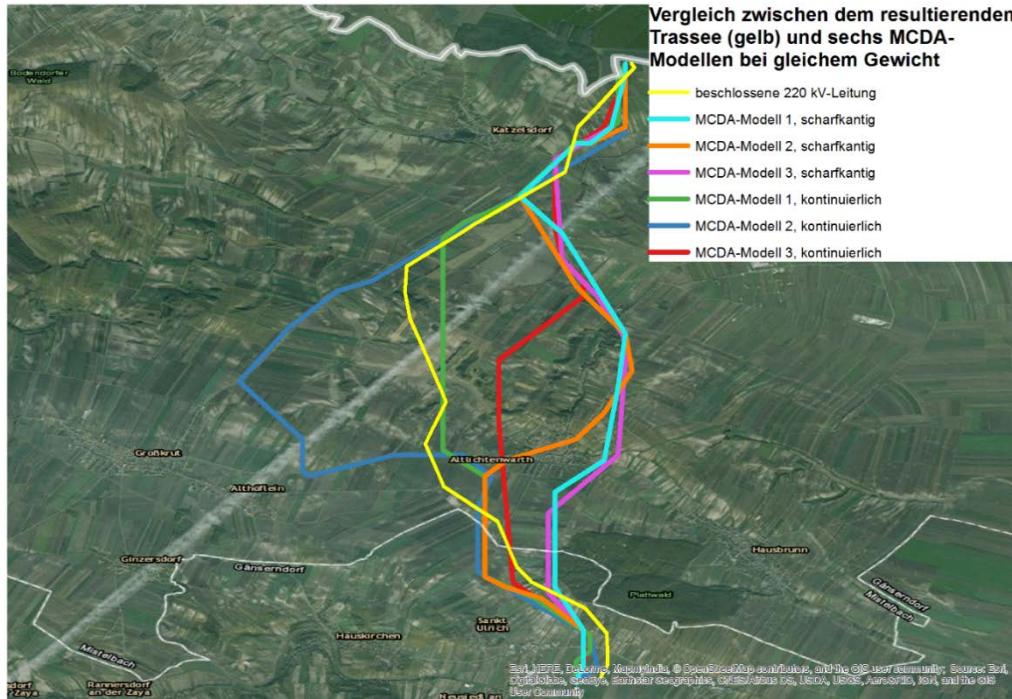


Abbildung 29: Die sechs MCDA-Modelle wurden mit einem intermediären Bewertungsmodell bewertet und ergaben die sechs Least Cost Paths. Diese Resultate wurden dem bereits festgelegten Trassee (gelb) gegenübergestellt.

4.3 Resultate der Nutzerstudie

Im Rahmen einer Nutzerstudie im März 2016 wurden 20 Leitungsplaner angefragt, einen Fragebogen über Raumeffekte, Grenzwerte und Planungsvorgänge auszufüllen. Der Fragebogen hatte als Ziel, die Logik nachvollziehen zu können, in der die Leitungsplaner Entscheidungen treffen. Hauptsächlich wurde erkannt, dass unterschiedliche Grenzwerte und Pufferdistanzen je Faktor angewandt werden. Die erhaltenen Werte wurden statistisch ausgewertet und in das 3D DSS integriert. Das verwendete Datenmodell wurde kritisch bewertet, was dazu führte, das Datenmodell hinsichtlich der thematischen Redundanz zu verbessern.

Im Mai/Juni 2016 wurde im Rahmen einer Masterarbeit (Song-Zinggeler 2016) eine Nutzerstudie über die Effektivität der Handhabung des 3D DSS durchgeführt, bei der Leitungsplaner von Swissgrid und BKW sowie Vertreter der Bundesämter BFE, ARE und BAFU teilgenommen haben. In den Resultaten der Masterarbeit erhielt das 3D DSS grundsätzlich ein positives Feedback, jedoch wurde festgehalten, dass gerade Leitungsplaner das MCDA-Modell gewöhnungsbedürftig empfanden, da es sich vom Bewertungsschema für Übertragungsleitungen unterscheidet. Einerseits sind viele Faktoren des Bewertungsschemas auch im 3D DSS vorhanden, doch ist deren Anzahl reduziert und richtet sich eher an übergeordneten Zielen aus, wie z.B. dem Schutz von Feuchtgebieten, anstelle die unterschiedlichen Feuchtgebietsinventare einzeln aufzulisten. Das Bewertungsschema hingegen listet mehr Faktoren auf und lässt vor allem auch eine quantitative Bewertung der davon abgeleiteten Attribute zu. Andererseits ist die Bewertungsskala im 3D DSS zwar fein, aber immer gleich aufgebaut

und orientiert sich an den Nebeneffekten, die der Bau einer Hochspannungsleitung bezüglich dieses Einflussfaktors ausüben würde. Abbildung 8 zeigt die dabei verwendete Skala, die von -2 («diese Zone ist für den Bau einer Leitung geeignet») bis +2 («diese Zone ist für den Bau einer Leitung nicht geeignet») reicht. Im Gegensatz dazu variiert die Skala des Bewertungsschemas für Übertragungsleitungen (UVEK 2013) und fokussiert auf die Bewertung messbarer Attribute. Darüber hinaus wurde die Positionierung der Masten im 3D DSS kritisiert und es wurden mehr Informationen bezüglich des MCDA-Modells und der Kosten gewünscht.

Diese Erkenntnisse halfen dem Forscherteam, Anpassungen in den kritisierten Punkten vorzunehmen und zu erarbeiten. Darüber hinaus wurde als Rahmen einer weiteren Masterarbeit festgelegt, die Mastpositionierung so zu optimieren, dass das vorgeschlagene Trasse realistischer abgebildet wird. Dazu wurden technisch und gesetzlich (durch Mindestabstände festgelegte) nicht realisierbare Trasses ausgeschlossen. Die Optimierung der Mastpositionen erfüllt außerdem das Kriterium des steigenden Detailgrads im Laufe des Planungsverfahrens (siehe Kapitel 3.7).

4.4 Resultate der Workshops

Im Frühjahr 2017 wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern drei Workshops durchgeführt. Dabei wurde das 3D DSS vorgestellt und der Prozess zur gemeinsamen Findung eines optimalen Korridors innerhalb eines gegebenen Untersuchungsgebiets simuliert (Wissen Hayek und Schito 2017). Die eingeladenen Teilnehmer hatten teilweise gute Vorkenntnisse über das jeweilige Gebiet und wurden dazu eingeladen, sich zusätzliche Unterlagen zum Gebiet und zur Funktionsweise des 3D DSS vorgängig durchzulesen. Darüber hinaus bewerteten die Teilnehmenden die Widerstände und Gewichtungen der Einflussfaktoren im Vorfeld des Workshops für folgende drei Szenarien:

1. Ein leitungs- und wirtschaftsfreundliches Szenario.
2. Ein Szenario, das die Umwelt und die Landschaft schützt.
3. Ein intermediäres Szenario.

Die Einstellungen aller Teilnehmenden wurden für den Workshop gemittelt und die Szenarien vorab berechnet. Ziel im Workshop war es dann, die drei Szenarien zu diskutieren und auf Basis der Erkenntnisse ein vierter, „ideales Szenario“ zu erstellen.

Der Ablauf der Workshops wurde wie folgt festgelegt:

1. Einführung in die Funktionsweise des 3D DSS.
2. Vorstellen der drei Szenarien, die sich durch die Bewertungen der Teilnehmer ergeben haben.
3. Diskutieren der Widerstände und Gewichtungen.
4. Erarbeiten des neuen, vierten Szenarios.
5. Diskussion.

Generell wurde das 3D DSS positiv bewertet. Dem 3D DSS wurde Potential zugeschrieben, für die Planung von Leitungen und für die Kommunikation eines Leitungsbauprojekts nützlich zu sein. Zeiter sparnis, Einfachheit und visuell ansprechende und funktionale Aufbereitung waren die Hauptargumente für den Einsatz des 3D DSS in der Praxis.

Kritisiert wurden hauptsächlich die Daten- und Entscheidungsmodelle, da Entscheidungsprozesse komplexer seien, als dies mittels MCDA zu quantifizieren versucht werde. Zudem berge der festgelegte Aufbau der Workshops die Gefahr, dass man den Fokus zu sehr auf die Beurteilung der Widerstände und Gewichtungen legt, anstatt das Problem ganzheitlich zu betrachten.

Die Rückmeldungen haben die in der MCDA gängige Frage aufgeworfen, wie viele Faktoren berücksichtigt werden sollen. Aus praktischer Sicht würden sich wenige Kategorien besser eignen, wohingegen sich Gesetze einer exakten Grundlage entbehren und daher eine genaue Auflistung der Faktoren erfordern. Hinzu kommt, dass die Faktoren im verwendeten Bewertungsschema für Übertragungsleistungen auch stark aufgeschlüsselt sind. Werden viele Faktoren modelliert, stellt sich jedoch die Frage, wie überlappende Gebiete mathematisch verrechnet werden sollen. In anderen Worten ist die Frage nach dem idealen MCDA-Modell durch eine geringe oder hohe Aufschlüsselung der Faktoren nicht gelöst.

Die Evaluation der Workshops hat dem Forscherteam geholfen, die Daten- und Entscheidungsmodelle anzupassen und sie näher an die Erwartungen der Experten zu bringen. Die Diskussionen über das 3D DSS gaben vor allem auch Aufschluss darüber, wie rechtliche Vorgaben bestmöglich in das Daten- und Entscheidungsmodell einfließen können.

5 Diskussion

Ziel des Projektes war es, einen 3D DSS-Prototyp zu entwickeln, der zwischen zwei Punkten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Faktoren eine Kostenoberfläche berechnet und davon den optimalen Korridor und ein mögliches Trassee für eine Leitung ableitet. Dieses 3D DSS soll Planer, Amtsvertreter und betroffene Parteien gleichermaßen im Planungsprozess von Leitungen unterstützen. In diesem Kapitel werden die Resultate dahingehend diskutiert, was aus technischer Sicht und vor allem auch in Bezug auf die Praxistauglichkeit des 3D DSS-Prototyps erreicht wurde. Dabei werden auch die Kommentare der Projektpartner aus dem Abschlussworkshop berücksichtigt.

5.1 Technische Entwicklung des 3D DSS

Die Resultate der Sensitivitätsanalyse legen offen, dass nicht nur der Widerstand und die Gewichtung, sondern auch das MCDA-Modell und das Abstufungsmodell der Widerstandsstufen das Resultat nachweislich beeinflussen. Folglich sollte eine Begleitgruppe in zukünftigen Entscheidungsprozessen ebenso diskutieren, wie weit welche Gebiete über ihre Grenzen hinaus vor dem Bau einer Leitung geschützt werden sollen. Zudem sollte eine Begleitgruppe festlegen, welche Stufe einer formulierten Antwortskala, einer sogenannten *Likert-Skala*, mit welchem mathematischen Wert modelliert wird. Die durchgeführte Auswertung hat ergeben, dass ein kontinuierliches Begrenzungsmodell, welches sich überlappende Schutzgebiete berücksichtigt, kombiniert mit einem Modell, das zwei benachbarte Antwortstufen einer Likert-Skala mit gleichen Werteabständen modelliert, zu Resultaten führt, die den geringsten Impact auf den menschlichen Lebensraum sowie auf die Landschaft und die Natur aufweisen.

5.1.1 Begrenzungsmodell sollte berücksichtigt werden

Es zeigte sich in einer Nutzerstudie, dass eine trennscharfe Abgrenzung nicht in jedem Fall sinnvoll ist, da eine schützenswerte Zone eine (abnehmende) Schutzwürdigkeit über ihre Grenzen hinaus ausstrahlt. Dieser Effekt wird im vorliegenden Bericht nachgewiesen und von Nutzern sowie auch Experten ebenfalls wahrgenommen. Da die Wahl des scharfkantigen oder kontinuierlichen Begrenzungsmodells einen signifikanten Einfluss auf das Resultat hat, sollte die Festlegung allfälliger zusätzlicher Pufferdistanzen überprüft werden (siehe Kapitel 3.3.3). Das 3D DSS erlaubt es bereits heute, adaptiv solche zusätzlichen Pufferdistanzen bei der Definition des Entscheidungsmodells einzugeben. Zu beachten gilt, dass das kontinuierliche Begrenzungsmodell Siedlungsgebiete grossräumiger umgeht als das scharfkantige Modell.

Das kontinuierliche Begrenzungsmodell wurde an einer Nutzerstudie signifikant favorisiert – unter anderem deshalb, da es eher den Erwartungen der Experten entspricht. Auch während der Kalibrierung des Prototyps anhand der Testdaten im Studiengebiet in Niederösterreich (siehe Abbildung 9, Abbildung 12 und Abbildung 29) stellte sich heraus, dass das kontinuierliche Begrenzungsmodell in Kombination mit der MCDA-Methode 1 dem definitiven Trassee am nächsten kam. Letztlich unterstützt die rechtliche Praxis den Ansatz, ein kontinuierliches Begrenzungsmodell in Betracht zu ziehen, indem Vor- und Gesamtbelastungen häufig für ein ganzes Gebiet abgewogen werden.

5.1.2 Geeignete Wahl der MCDA-Methode

Die Evaluation einer Umfrage ergab, dass die Maximalwertmethode (MCDA-Modell 3) zwar das intrinsische Entscheidungsmodell vieler Entscheidungsträger gut abbildet, aber in der Modellierung häufig zu Lösungen führt, die bezüglich der Linienführung zu gerade sind und unrealistische Lösungen vorschlägt. Die Auswertung der Sensitivitätsanalyse bestätigt diese Aussage. Experten tendieren aufgrund der verringerten Schutzwürdigkeit für mehrfach geschützte Gebiete eher dazu, das logarithmisch korrigierte MCDA-Modell 2 gegenüber dem simplen MCDA-Modell 1 zu bevorzugen. Die Sensitivitätsanalyse ergab, dass zwischen den MCDA-Modellen 1 und 2 nur ein marginaler Unterschied besteht, wobei das MCDA-Modell 1 generell etwas mehr Korridorvarianten vorschlägt als das MCDA-Modell 2.

5.1.3 Einfluss des Datenmodells

Die Autoren erachten es als möglich, dass die Definition des Datenmodells in Abhängigkeit des Studiengebiets einen Einfluss auf die Qualität der Resultate haben könnte. Diese Aussage beruht auf der Feststellung, dass sich die Korrelationsmuster zwischen den beiden untersuchten Studiengebieten nicht sehr ähnlich waren. Außerdem waren in Kärnten erkennbar mehr nichtsignifikante Effekte der unabhängigen auf die abhängigen Variablen messbar als im Gebiet Innertkirchen – Mettlen. Deshalb empfehlen die Autoren, bei weiteren vergleichenden Studien zu überprüfen, dass die Entscheidungs- und Datenmodelle unterschiedlicher Studiengebiete so aufgebaut werden, dass sie sich mit denselben Analyseinstrumenten vergleichen lassen. Dazu ist es erforderlich, dass die Varianz der modellierten Realisierungen zwischen den Studiengebieten ähnlich hoch sein sollte, damit unterschiedliche Parametereinstellungen in allen Gebieten zu einem vergleichbaren Effekt führen.

5.1.4 Wahl der Nutzenfunktion

Die Resultate der Sensitivitätsanalyse erzielten bei der Analyse des Einflusses der Nutzenfunktion häufig nichtsignifikante Effekte. Ein Grund dafür könnte darin liegen, dass Werte, die über eine Likert-Skala sprachlich abgefragt (z.B. mit «Wie gut eignet sich Faktor XY für den Bau einer Hochspannungsleitung?») und mit den Begriffen «geeignet», «weitgehend geeignet», «neutral», «weitgehend ungeeignet» und «ungeeignet» inhaltlich bewertet und in ein subjektives Einschätzungsmodell übertragen werden mussten. Bei diesem Prozess stellt sich unweigerlich die Frage, wie der Entscheidungsträger die sprachlichen Begriffe in ein mathematisch definierbares Wertesystem überführt, im Sinne, ob beispielsweise «geeignet» doppelt oder dreimal so gut ist wie «weitgehend geeignet».

Das Forschungsteam schlägt deshalb vor, entweder:

- a) auf die Unterscheidung zwischen der linearen Nutzenfunktion $u_1(w)$ und der exponentiellen Nutzenfunktion $u_4(w)$ (beide siehe Abbildung 11) zu verzichten oder
- b) eine Standard-Nutzenfunktion zu wählen, welche die besten Werte bezüglich der Zielerreichung erhält (möglicherweise ist die Nutzenfunktion 2 gemäß Abschnitt 3.3.5 ein Kandidat, da die Unterschiede zu dieser Funktion immer signifikant waren) oder
- c) die Wahl der Nutzenfunktion über eine geeignete MCDA-Abfragetechnik dem Entscheidungsträger zu überlassen.

5.1.5 Interpretation der Korrelationsanalyse

Da die Resultate der Korrelationsanalyse zwischen beiden Studiengebieten relativ heterogen ausgefallen sind, lässt sich davon kein eindeutiges Muster ableiten. Es ist jedoch denkbar, mit hohen Korrelationen Covariaten zu finden, die einen ähnlich positiven oder negativen Effekt erzielen. Beispielsweise wurden die Resultate der Maximalwertmethode häufig als unrealistisch bewertet (siehe Abschnitt 5.1.2). Dadurch, dass das in Tabelle 7 kontinuierlich begrenzte MCDA-Modell der Maximalwertmethode stark mit der Nutzenfunktion 3 korreliert ($R = 0.8$), könnte man über diesen Zusammenhang ebenso diese Nutzenfunktion ausschliessen, da sie tendenziell ähnliche Resultate wie die Maximalwertmethode erzielt. Eine noch höhere Korrelation findet sich zwischen der Nutzenfunktion 2 und dem Gewichtungsmodell 2. Hinsichtlich dieser Überlegungen fällt es auf, dass in der Tabelle 8: Pearson's R Korrelationskoeffizienten zwischen den gemittelten Karten der jeweiligen Ausprägung für das Studiengebiet Kärnten. M = MCDA-Modell, s = scharfkantig, k = kontinuierlich, N = Nutzenfunktion, G = Gewichtungsmodell. Hellblau eingefärbt sind Wechselwirkungen mit mittlerer Korrelation, während Relationen mit hoher Korrelation dunkelblau hinterlegt sind. die Nutzenfunktion 2 ebenso hoch mit der Gewichtungsfunktion 2 korreliert war ($R = 0.84$). Man könnte also prüfen, ob die Kombination der zwei Ausprägungen generell zu robusteren Resultaten führt als andere Kombinationen. Allerdings lässt sich keine allgemeingültige Regel für solche Korrelationen ableiten, sodass diese in Abhängigkeit des Studiengebiets auf Basis der vorhandenen Daten analysiert und festgelegt werden müssen.

5.2 Einsatz in der Praxis – Diskussion der Nutzerevaluation

Die Erkenntnisse, die aus den Resultaten der Nutzerevaluation (Wissen Hayek und Schito 2017) gezogen werden können, geben Aufschlüsse, wie gut das 3D DSS bereits nutzbar ist und in welche Richtung es weiterentwickelt werden könnte. In der Diskussion der Resultate wird der Fokus auf die folgenden drei Punkte gelegt: (1) Gestaltung von Workshops, bei dem das 3D DSS eingesetzt wird, (2) Funktionalität des 3D DSS und Nutzerzufriedenheit und (3) Ansätze zur Weiterentwicklung des 3D DSS.

5.2.1 Gestaltung der Workshops

Grundsätzlich hat sich das Konzept zur Gestaltung von Workshops, in denen das 3D DSS vorgestellt und anschliessend zur Erarbeitung von alternativen Korridorvarianten eingesetzt wird, als praktikabel erwiesen. Sehr klar herausgestellt hat sich, dass unbedingt ein moderierter Einsatz des 3D DSS in Beteiligungsprozessen erfolgen sollte.

Zum einen ist das Verstehen der Logik des 3D DSS sehr wichtig, damit die unterschiedlichen, aufeinander aufbauenden Anwendungsschritte verstanden werden. Dafür sind nach Ansicht der Workshop-Teilnehmenden gute Erläuterungen notwendig. Darüber hinaus sollten die Teilnehmenden bereits im Vorfeld über das jeweilige Studiengebiet informiert werden, damit sie in der Lage sind, sich aktiv an der Diskussion über die Priorisierung der verschiedenen Faktoren zu beteiligen. Für den Untersuchungsraum Innertkirchen – Mettlen erwies sich dabei das von der HSR erstellte Raumbuch (Kleiner u. a. 2015), das im Rahmen der Entwicklung eines Leitfadens zur Planung von Höchstspannungsleitungen (Kleiner u. a. 2016) erstellt wurde, als äusserst hilfreich, da es alle relevanten Faktoren beschreibt, die sich auf die Landschaft und die Natur beziehen.

Zum anderen wird für diese Diskussion eine gute Einbettung des 3D DSS zur Informationsvermittlung benötigt. Zum Beispiel sollte es dazu eingesetzt werden, die räumliche Lage und Ausdehnung der relevanten Flächen bezüglich der verschiedenen planungsrelevanten Faktoren aufzuzeigen. Parallel dazu eine Übersicht mit der Liste aller Faktoren zu präsentieren, mit der die Teilnehmenden gemeinsam die Widerstände und Gewichtungen definieren, ist eine zielführende Methode. Allerdings sollte nochmals überlegt werden, ob die Diskussion anders geführt werden kann. Denn in den Workshops gab es die Tendenz, dass nur einige wenige Teilnehmende die Diskussion dominierten und somit ihre Meinung sehr stark in den resultierenden Szenarien abgebildet wurde. Es sollte deshalb eventuell ein anderes Format für die Abwägungsdiskussion gefunden werden, bei der die verschiedenen Faktoren von den Teilnehmenden vertiefter diskutiert und gegeneinander abgewogen werden.

5.2.2 Funktionalität des 3D DSS und Nutzerzufriedenheit

Insgesamt wird das 3D DSS als gute Diskussionsbasis für Beteiligungsprozesse angesehen. Insbesondere wurden die gute Bedienbarkeit und die sehr gut unterstützende Visualisierung in den Workshops hervorgehoben. Die Benutzeroberfläche wird als logisch aufgebaut empfunden und bietet eine einfach nachvollziehbare Benutzerführung, vor allem auch, da die durchzuführenden Schritte im 3D DSS analog zum tatsächlichen Verfahren einer Leitungsplanung sind. Positiv beurteilt wird auch, dass es ein Voraggregat vieler Datenlayer bietet, auf deren Basis innerhalb kurzer Zeit Varianten berechnet und dargestellt werden können. Ein Nutzen dieser Funktionen wurde vor allem darin gesehen, in Vorprojekten komplexe Prozesse bei der Planung von Leitungen zu veranschaulichen. Es wurde aber auch deutlich gemacht, dass das 3D DSS eher für eine erste Evaluation verschiedener Alternativen relevant ist und nicht für das Finden von eindeutigen Resultaten. Diese Einschränkung im Einsatzbereich des 3D DSS lässt sich vor allem auf die geäusserten Kritikpunkte an dem Tool zurückführen (siehe Abschnitt 4.3 und Abschnitt 4.4).

Sehr kritisch beurteilt wurde der Berechnungsalgorithmus für Korridore, der offensichtlich noch fehlerhaft ist (z.B. Leitungsvariante über Flugplatz). Um in tatsächlichen Planungsprozessen als Tool eingesetzt zu werden, ist eine weitere, sorgfältige Kalibrierung des Algorithmus bzw. der Grundlagendaten notwendig. So sollten Datensätze beispielsweise zum Teil weiter differenziert werden. Auch die Skala zur Einstufung von Widerständen und Gewichtungen kann in einigen Fällen zu pauschal sein, um die tatsächlich vorhandenen räumlichen Spielräume richtig darzustellen. Ebenso ist auch die Auflösung der Grundlagendaten in einem Hektarraster unter Umständen zu grob, da einige mögliche Standorte auf diese Weise nicht berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere problematisch, da das 3D DSS somit Varianten aufzeigt, die nur scheinbar sehr genau sind. Ein weiterer wesentlicher Mangel ist, dass die Möglichkeit einer Erdverkabelung nicht berücksichtigt wird. Aufgrund dieser Punkte wird das 3D DSS in Bezug auf die Funktionsweise insgesamt als noch zu theoretisch beurteilt.

Einige Kritikpunkte, die in der Nutzerstudie bzw. im ersten Workshop geäussert wurden, konnten bereits bis zum darauffolgenden Workshop beseitigt werden. So wurde zum Beispiel die als nicht intuitiv angesehene Bewertungsskala für die Widerstände und Gewichtungen geändert (siehe Abschnitt 3.3.4). Auch die Berechnungsalgorithmen sind im heute verfügbaren Prototyp so schnell, dass sie den zeitlichen Ansprüchen in einem Workshop gerecht werden.

Für die weitere Verbesserung des 3D DSS ist vor allem eine Kalibrierung notwendig. Hierbei sollten die Kriterien unter Berücksichtigung der gesetzlichen Rahmenbedingungen und der Möglichkeiten in der Praxis weiter differenziert werden. Für Beteiligungsworkshops sollte geprüft werden, ob nur eine

Gewichtung der Kriterien zugelassen werden sollte, während die Widerstände bereits gemäss den gesetzlichen Vorschriften definiert sind. Zudem sollten nicht nur Korridorvarianten für Freileitungen, sondern auch für Erdverkabelungen, möglichst in Kombination mit Freileitungen, mit dem 3D DSS aufgezeigt werden können. Wichtig ist, dass dabei die Berechnungszeit möglichst kurz bleibt, so dass das 3D DSS für den interaktiven Einsatz in Beteiligungsworkshops attraktiv ist.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der entwickelte Prototyp des 3D DSS hat insgesamt ein grosses Potential, sowohl Experten als auch andere Interessenvertreter bei der Planung von Leitungen als Denk- und Diskussionsplattform zu unterstützen. Das erhaltene Feedback an den Demonstrationen und Workshops war positiv und die Thematik derart aktuell, dass aus dem vorliegenden Projekt das ETH-SpinOff Gilytics entstanden ist, um die Idee eines 3D DSS weiterzuverfolgen und daraus ein markttaugliches Produkt für die Unterstützung der Planung elektrischer Energieinfrastruktursysteme zu entwickeln. Für den tatsächlichen Einsatz in der Praxis sollten die Datengrundlagen und die Modellierungsansätze weiter kalibriert werden. Zudem haben sich im Laufe des Projekts neue Fragen ergeben. So sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Datensätze auf das Resultat haben. Eine weitere, drängende Frage ist, wie der Ansatz erweitert werden sollte, um Erdkabel bzw. kombinierte Erdkabel und Freileitungen im 3D DSS berechnen und darstellen zu können. Nicht zuletzt ist es aber ebenso wichtig, die Gestaltung des Dialogs mit verschiedenen Interessenvertreter weiter zu verbessern. Es sollte untersucht werden, wie das 3D DSS in Kombination mit anderen Medien oder 3D-Visualisierungstechnologien eingesetzt werden kann, so dass sich alle Interessenvertreter in den Planungs- und Kommunikationsprozess angemessen einbringen können. Denn dies ist eine wichtige Voraussetzung, um die Akzeptanz einer geplanten Leitung zu steigern.

7 Referenzen

- Baumann, Jürg, und Stefan Joss. 2007. «Hochspannungsleitungen. Vollzugshilfe zur NISV. Vollzugs-, Berechnungs- und Messempfehlung.» Entwurf zur Erprobung. Umwelt-Vollzug. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Belton, Valerie, und Theodor Stewart. 2002. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media.
- Bevanger, Kjetil, Gundula Bartzke, Henrik Brøseth, Espen Lie Dahl, Jan Ove Gjershaug, Frank Hanssen, Karl-Otto Jacobsen, u. a. 2014. «Optimal design and routing of power lines; ecological, technical and economic perspectives (OPTIPOL).» Final Report 1012. NINA Rapport. Trondheim, Norway: Norwegian Institute for Nature Research. (NINA). ISBN: 978-82-426-2622-6.
- Bräunlich, Reinhold. 2017. Interview bezüglich Fragen zu HochspannungsthemenTelefon.
- Bundesrat der Schweizerischen Eidgenossenschaft. 1994. *Verordnung vom 30. März 1994 über elektrische Leitungen. SR 734.31.* <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19940083/index.html>.
- . 1999. *Verordnung vom 23. Dezember 1999 über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung. SR 814.710.* <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19996141/index.html>.
- Eisenführ, Franz, Martin Weber, und Thomas Langer. 2010. *Rational Decision Making*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Experten am Swissgrid-Workshop. 2017. Schlussdiskussion mit den Leitungsplanungsexperten am Swissgrid-Workshop vom 23.01.2017Kolloquium.
- Figueira, José, Salvatore Greco, und Matthias Ehrgott. 2005. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer Science & Business Media.
- Grassi, Stefano, Roman Friedli, Michel Grangier, und Martin Raubal. 2014. «A GIS-Based Process for Calculating Visibility Impact from Buildings During Transmission Line Routing». In *Connecting a Digital Europe Through Location and Place*, herausgegeben von Joaquín Huerta, Sven Schade, und Carlos Granell, 383–402. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer International Publishing.
- Houston, Gayle, und Christy Johnson. 2006. «EPRI-GTC Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology». Technical Report 1013080. Palo Alto (CA) and Tucker (GA), USA: Electric Power Research Institute and Georgia Transmission Corporation.
- Jullier, Joshu. 2016. «More acceptance for power lines in Switzerland: An evaluation of the acceptance increasing factors for transmission lines in Switzerland». Master Thesis, Zurich, Switzerland: ETH Zurich. DOI: 10.3929/ethz-b-000240496. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000240496>.
- Kleiner, Joachim, Hans-Michael Schmitt, Roger Bräm, Manuela Egger, und Susanne Schellenberger. 2015. «Raumbuch – Untersuchungsraum Mettlen - Innertkirchen». Herausgegeben von Swissgrid.
- . 2016. «Leitfaden zur Planung von Höchstspannungsleitungen». Herausgegeben von Swissgrid.
- Lienert, Pascal, Bernadette Sütterlin, und Michael Siegrist. 2017. «The influence of high-voltage power lines on the feelings evoked by different Swiss surroundings». *Energy Research & Social Science* 23 (Supplement C): 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.11.010>.
- Malczewski, Jacek. 1999. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Mosimann, Hans-Jakob, und Marion Völger Winsky. 2012. *Öffentliches Recht: Ein Grundriss für Studium und Praxis*. 2. Aufl. Zürich: Schulthess Juristische Medien.
- Nefzger, Dipl-Ing Peter, Dipl-Ing João Felix Nolasco, und Dipl-Ing Ulf Kaintzyk. 2003. «Route selection and detailed line design». In *Overhead Power Lines*, 573–620. Springer.

- Piveteau, Nadine. 2017. «A Novel Approach to the Routing Problem of Overhead Transmission Lines». Master Thesis, Zürich: Universität Zürich UZH.
- Rendigs, Silke. 2016. «Transformation des Schweizer Stromübertragungsnetzes: Herausforderungen und Aufgaben für die Raumplanung». Zürich: ETH Zürich. <http://doi.org/10.3929/ethz-a-010811899>.
- Saaty, Thomas L. 1980. «The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation». *New York: McGraw*.
- Schito, Joram, und Stefano Grassi. 2015. «Berechnung optimaler HSL-Pfade und Korridore für Hochspannungsleitung». In *Leitfaden 3D-GIS und Energie*, herausgegeben von Philipp Willkomm, Robert Kaden, Volker Coors, und Thomas H. Kolbe, 80–82. Runder Tisch GIS e.V.
- Song-Zinggeler, Julia. 2016. «Usability Testing of Decision-Support System for Power Line Planning». Master's Thesis, Zurich: ETH Zurich.
- Tobler, Waldo R. 1970. «A computer movie simulating urban growth in the Detroit region». *Economic geography*, 234–240.
- UVEK. 2001. «Sachplan Übertragungsleitungen (SÜL)». Bundesamt für Energie (BAFU) und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) im Auftrag des Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.
- . 2013. «Bewertungsschema für Übertragungsleitungen». Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern, Schweiz. <http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/30094.pdf>.
- Weber, Martin. 2015. Interview bezüglich der Planung von Hochspannungsleitungen und technischen Aspekten von HochspannungsleitungenInterview.
- Wissen Hayek, Ulrike, und Joram Schito. 2017. «Decision Support System (3D DSS) zur Unterstützung der Planung von Übertragungsleitungen: Auswertung der Nutzerevaluation». Zürich: ETH Zürich.
- Zheng, Jun, Christoph Egger, und Judit Lienert. 2016. «A scenario-based MCDA framework for wastewater infrastructure planning under uncertainty». *Journal of Environmental Management* 183 (Part 3): 895–908. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.027>.