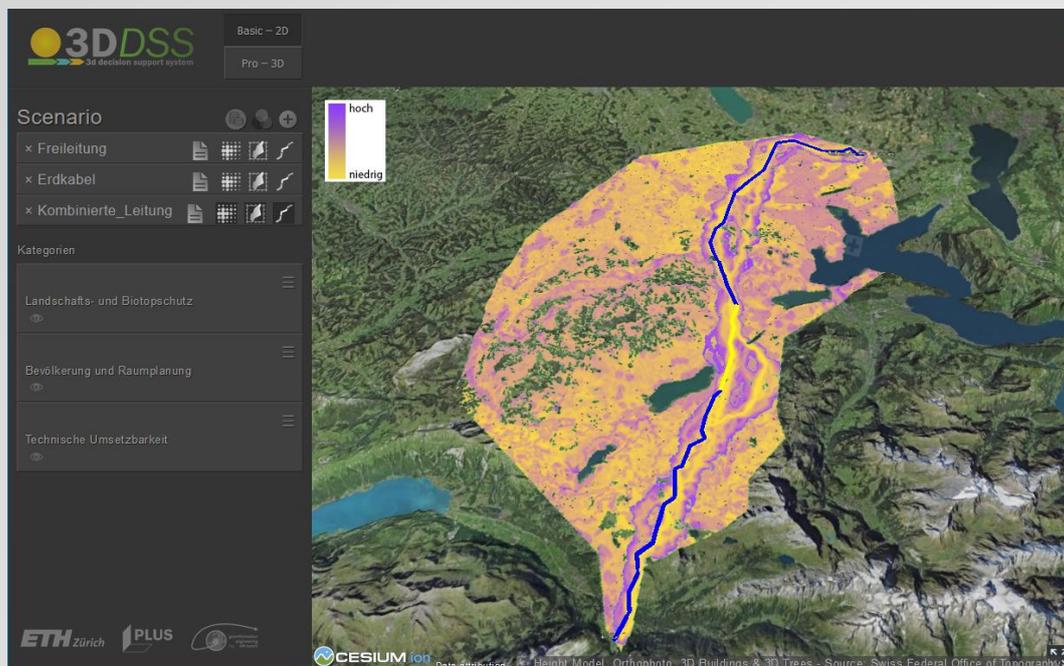


# 3D Decision Support System (3D DSS) zur Unterstützung der Leitungsplanung

## Technische Anleitung

November 2020



## Autoren

Joram Schito  
ETH Zürich  
Institut für Kartografie und Geoinformation  
Professur Geoinformations-Engineering  
Stefano-Francini-Platz 5  
HIL G 23.1  
CH – 8093 Zürich Hönggerberg  
[www.ikg.ethz.ch](http://www.ikg.ethz.ch)

Dr. Ulrike Wissen Hayek  
ETH Zürich  
Institut für Raum- und Landschaftsentwicklung  
PLUS, Planung von Landschaft und Urbanen Systemen  
Stefano-Francini-Platz 5  
HIL H 52.2  
CH – 8093 Zürich Hönggerberg  
[www.plus.ethz.ch](http://www.plus.ethz.ch)

## Danksagung

Das 3D DSS entstand durch ein iteratives Vorgehen, bei dem die Feedbacks zahlreicher Expertinnen und Experten kontinuierlich in das Programm eingebettet wurden. Nebst den Ansprechpersonen unserer Projektpartner gebührt unser herzlichster Dank auch den vielen Vertreterinnen und Vertreter der Bundesbehörden BFE, BAFU und ARE. Durch das 3D DSS-Projekt ergaben sich die vier Masterarbeiten von Song-Zinggeler (2016), Piveteau (2017), Schoinas (2018) und Moncecchi (2020), die durch ihre Arbeiten wesentlich zur Verbesserung des 3D DSS beigetragen haben. Herzlichen Dank dafür.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Hintergrund und Zweck des Dokuments .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Funktionsprinzip des 3D DSS.....</b>	<b>5</b>
2.1	Genereller Ablauf .....	5
2.2	Ziele und Gewichtungen .....	6
2.3	MCDA-Theorie: Modellierungsansätze .....	8
<b>3</b>	<b>Technische Anmerkungen.....</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Benutzeroberfläche .....</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Einsatz: Schritte und Funktionen.....</b>	<b>12</b>
5.1	Neues Szenario erstellen .....	12
5.2	Widerstand der Faktoren definieren und Faktoren gewichten .....	13
5.2.1	Funktionsprinzip .....	13
5.2.2	Anwendung .....	14
5.3	Modellierung von Übertragungsleitungen durch den Ansatz A.....	19
5.3.1	Raumwiderstand berechnen .....	19
5.3.2	Planungsgebiet berechnen .....	22
5.3.3	Korridor berechnen .....	23
5.3.4	Berechnungsmodell der indikativen Baukosten .....	23
5.3.5	Wichtig: zu beachten.....	24
5.4	Modellierung von Übertragungsleitungen durch den Ansatz B .....	25
5.5	Modellierung von kombinierten Leitungen .....	27
5.6	Zusätzliche Modellierungsfunktionen.....	28
5.6.1	Evaluation eines vorgegebenen Leitungsverlaufs .....	28
5.6.2	Ermittlung von Lösungsclustern mit hoher räumlicher Varianz .....	30
5.6.3	Finden von Pareto-optimalen Leitungsverläufen .....	30
5.6.4	Ermittlung kombinierter Leitungen anhand eines probabilistischen Ansatzes .....	30
5.6.5	Ermittlung exakter Mastpositionen.....	30
5.6.6	Ermittlung von Gewichtungen durch unterschiedliche Fragetechnik .....	30
5.7	2D-Visualisierung des Raumwiderstands, Planungsgebiets und Korridors .....	31
5.7.1	Berechnete Szenarien laden.....	31
5.7.2	Raumwiderstand, Planungsgebiet und Korridor anzeigen .....	32
5.7.3	Korridor – Indikative Baukosten .....	34
5.7.4	Korridore verschiedener Szenarien vergleichen.....	34
5.8	3D-Visualisierung eines Trassees .....	35
5.8.1	Kamera: Leitung aus verschiedenen Perspektiven betrachten .....	35
5.8.2	Anzeigen: Strommasten, Leitungen, Gebäude, etc. ....	36
5.8.3	Bearbeiten: Masten verschieben .....	39
5.8.4	Projekt: Sichern und Laden.....	39
5.9	3D-Visualisierung von bestehenden Leitungen (Zürich) .....	40
5.10	Visualisierung von alternativen Netzwerkpfaden (Zürich) .....	45
5.11	Visualisierung von weiteren Informationen für die Analyse (Zürich) .....	46
5.11.1	ÖREB-Kataster .....	46
5.11.2	NISV-Buffer.....	46
<b>6</b>	<b>Verwendete Datensätze .....</b>	<b>47</b>
6.1	Kategorie «Umwelt-/Biotopschutz» .....	48
6.1.1	Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung.....	48
6.1.2	Feuchtgebiete.....	48
6.1.3	Landschaften mit hoher Schutzwürdigkeit.....	48
6.1.4	Landschaftsprägende charakteristische Objekte.....	48

6.1.5	Moorbiotope .....	49
6.1.6	Moorlandschaften .....	49
6.1.7	Naturschutzgebiete .....	49
6.1.8	Pärke .....	49
6.1.9	Schutzwürdige Feuchtgebiete .....	50
6.1.10	Schutzzonen nach Jagdgesetz (auf Säugetiere beschränkt) .....	50
6.1.11	Trockenwiesen und –weiden.....	50
6.1.12	UNESCO-Biosphärenreservate .....	50
6.1.13	UNESCO Weltnaturerbe .....	50
6.1.14	Vogelschutzzonen .....	50
6.1.15	Wald .....	50
<b>6.2</b>	<b>Kategorie «Raumplanung» .....</b>	<b>51</b>
6.2.1	Bestehende Übertragungsleitungen .....	51
6.2.2	Breite Strassen und Eisenbahnlinien .....	51
6.2.3	Flugplätze und –häfen.....	51
6.2.4	Gebäude.....	51
6.2.5	Gebiete innerhalb des Lärmimmissionsgrenzwerts von 40 dBA .....	51
6.2.6	Historisch wichtige Orte und Gebiete .....	52
6.2.7	Industriezonen .....	52
6.2.8	Infrastrukturanlagen .....	52
6.2.9	ISOS-Objekte .....	52
6.2.10	Kulturgüterschutzobjekte.....	52
6.2.11	Kiesgruben.....	53
6.2.12	Landwirtschaftszonen .....	53
6.2.13	Militäranlagen .....	53
6.2.14	Öffentliche Kernzonen.....	53
6.2.15	Öffentliche Verkehrszonen.....	53
6.2.16	Potentielle Sichtbarkeit neuer Übertragungsleitungen .....	53
6.2.17	Seilbahnen.....	53
6.2.18	Spezielle Bahnen .....	54
6.2.19	Tourismuszonen und Naherholungsgebiete.....	54
6.2.20	Tunnel.....	54
6.2.21	Ungeeignete Exposition.....	54
6.2.22	Wohn-, Arbeits- und Mischzonen.....	54
<b>6.3</b>	<b>Kategorie «Technische Umsetzbarkeit».....</b>	<b>54</b>
6.3.1	Naturgefahrenzonen .....	54
6.3.2	Oberflächengewässer .....	55
6.3.3	S1-Grundwasserzonen und Gewässerraum .....	55
6.3.4	S2-Grundwasserzonen und Grundwasserschutzareal .....	55
6.3.5	Gewässerschutzbereich Ao .....	55
6.3.6	Gewässerschutzbereich Au .....	55
6.3.7	Zuströmbereich Zo .....	55
6.3.8	Zuströmbereich Zu .....	55
6.3.9	Zonen Sh und Sm.....	55
6.3.10	Ungeeigneter geologischer Untergrund.....	55
6.3.11	Ungeeignetes Relief.....	56
6.3.12	Untergrundinfrastrukturanlagen.....	56
6.3.13	Verbleiben im selben Tal (valleyness) .....	56

## 1 Hintergrund und Zweck des Dokuments

Die ETH Zürich hat in Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Kartografie und Geoinformation (IKG) und dem Institut für Raum- und Landschaftsentwicklung, Planung von Landschaft und Urbanen Systemen (PLUS) ein Tool zur Unterstützung bei der Findung von Planungsgebieten und Korridoren beim Planen von Leitungen entwickelt. Dies erfolgte unter dem Patronat des Bundesamts für Energie (BFE, Netze) und von 2014–2017 unter Mitbeteiligung von Austrian Power Grid (APG), Bernische Kraftwerke AG (BKW) und Swissgrid AG. Eine Erweiterung des Tools mit der Integration von Erdkabeln erfolgte von 2018–2020 mit der Unterstützung vom BFE, dem Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) sowie der schweizerischen und der belgischen Netzbetreiberfirmen, Swissgrid AG und Elia Power Systems.

Das entwickelte Tool dient dazu, die Planung, Analyse und Kommunikation im Sachplanverfahren zu unterstützen und wird folgend als **3D Decision Support System (3D DSS)** bezeichnet. Dieses Dokument dient dazu, das Funktionsprinzip des 3D DSS zu erläutern.

## 2 Funktionsprinzip des 3D DSS

### 2.1 Genereller Ablauf

Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt das 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 Definition der Widerstände erfolgte aufgrund mehrerer Befragungen und Studien über einen Zeitraum von sechs Jahren und stützt sich sowohl auf gesetzliche Grundlagen sowie auf das Bewertungsschema für Übertragungsleitungen (BFE 2013).

Die Faktoren werden zusätzlich aufgrund der Interessen der Stakeholder hinsichtlich mehrerer Ziele gewichtet (3), was im Kapitel 2.2 näher erläutert wird. Das 3D DSS errechnet aus diesen Vorgaben mit einer *multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA)* (4) eine *Raumwiderstandskarte* für den gesamten Betrachtungsraum. Als MCDA-Methode wird dabei *weighted linear combination* angewendet, da sich diese aufgrund der 2018 durchgeführten Studie (Schito, Wissen Hayek, und Raubal 2018) als die zielführendste Methode erwies, um den Sachverhalt mit allen Elementen des Entscheidungsmodells gegenüber dem Verständnis der Stakeholder zu modellieren.

Durch die Anwendung der MCDA ergibt sich für jedes Setting an Einstellungen eine sogenannte *Alternative*. Als Resultat der MCDA lässt sich eine *Kostenoberfläche* ermitteln, welche als Basis für die anschließende *Least Cost Path (LCP)-Analyse* (5) zur Modellierung eines Planungsgebiets sowie eines möglichen Korridors dient. Zudem können für den berechneten Korridor die *indikativen Baukosten* angezeigt und (6) eine 3D-Visualisierung eines Trassees erzeugt werden.

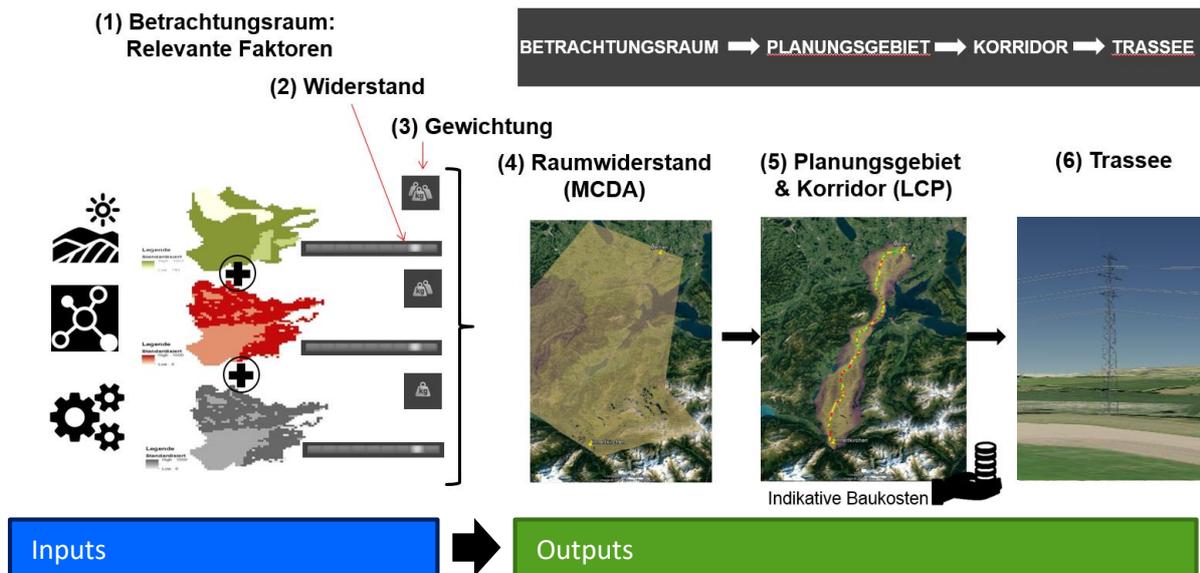


Abbildung 1: Informationsverarbeitungs-Pipeline des 3D DSS.

## 2.2 Ziele und Gewichtungen

Stakeholder können im 3D DSS im Voraus definieren, wie wichtig ihnen die in der Abbildung 2 unter  $\Omega$ ,  $\Theta$  und  $\Xi$  aufgeführten Ziele sind. Dies geschieht unter Anwendung des direct rating-Verfahrens<sup>1</sup>. Die  $\Omega$ -Werte dienen zudem als Gewichte für die MCDA, woraus das 3D DSS den optimalen Korridor samt *least cost path* berechnet. Da der *least cost path* die Ideallinie innerhalb des Korridors darstellt, beziehen sich die berechneten Indikatorwerte für die Ziele  $\Omega$ ,  $\Theta$  und  $\Xi$  immer auf den *least cost path*.

Die Indikatorwerte oberhalb der gestrichelten Linie in Abbildung 2 ( $\Omega$  und  $\Theta$ ) können als direkte Gütemasse interpretiert werden, während die Indikatorwerte unterhalb der gestrichelten Linie ( $\Xi$ ) in Relation zu anderen Alternativen gesetzt werden müssen, um interpretiert werden zu können. Die Indikatoren geben an, wie geeignet oder ungeeignet eine Leitung hinsichtlich eines Ziels ist. Durch Anwendung von linearer Programmierung kann zudem ermittelt werden, welche unter mehrerer Alternativen hinsichtlich der Zielgewichtung die Beste ist.

Die im 3D DSS verwendeten Indikatorgruppen  $\Omega$ ,  $\Theta$  und  $\Xi$  wurden wie folgt festgelegt:

- $\Omega$  umfassen alle Ziele, die sich auf Kriterien beziehen, die eine räumliche Ausprägung haben und die Lage und den Verlauf des Korridors beeinflussen, da sie in der MCDA als *Gewichte* eingesetzt werden. Nach der Durchführung der MCDA ergibt sich ein Resultat auf einer Skala von 0–100%, das angibt, zu wie vielen Prozent das entsprechende Ziel erreicht wurde. Um dies zu berechnen, wird ermittelt, über wie viele Meter der berechnete *least cost path* ein Schutzgebiet des entsprechenden Ziels schneidet. Ein Gütemass von 100% bedeutet, dass keine Schutzgebiete tangiert werden, während 0% aussagt, dass über die ganze Länge des *least cost path* Schutzgebiete des entsprechenden Ziels durchquert werden.

<sup>1</sup> Das direct rating-Verfahren wurde bewusst gewählt, da das 3D DSS die Skalenwerte durch Hovern interaktiv anzeigt. Schoinas (2018) fand durch eine Studie mit dem 3D DSS heraus, dass sich die berechneten Korridore nicht signifikant von denen unterscheiden, die sich durch eine vergleichende Ermittlungsmethode ergeben. Dieses Thema wird in der Dissertation von Schito (2020) näher erläutert.

- $\Theta$  umfasst das Ziel, die Länge des least cost path zu verringern, der sich durch die Anwendung der MCDA und somit erst durch die Ermittlung des Korridors ergibt. Je nach Modellvoraussetzungen kann er aktiv beeinflusst werden<sup>2</sup> oder nicht<sup>3</sup>. Als Resultat kann auf einer Skala von 0–100% ermittelt werden, zu wie vielen Prozent dieses Ziel erreicht wurde. Ein Gütemass von 100% bedeutet, dass die Länge des least cost path minimal ist (also der Luftdistanz entspricht) während bei 0% der least cost path dem Doppelten der Luftdistanz entspricht.
- $\Xi$  umfassen alle Ziele, die sich auf Indikatoren beziehen, die vom Verlauf des Korridors abhängen und erst nach dessen Berechnung bestimmt werden können. Als Resultat ergibt sich ein Wert, der mit anderen verglichen werden kann, aber kein direktes Gütemass angibt, da diese Indikatoren intervallskaliert sind. Um ein solches Resultat zu interpretieren, muss es mit den Resultaten anderer Alternativen verglichen werden.

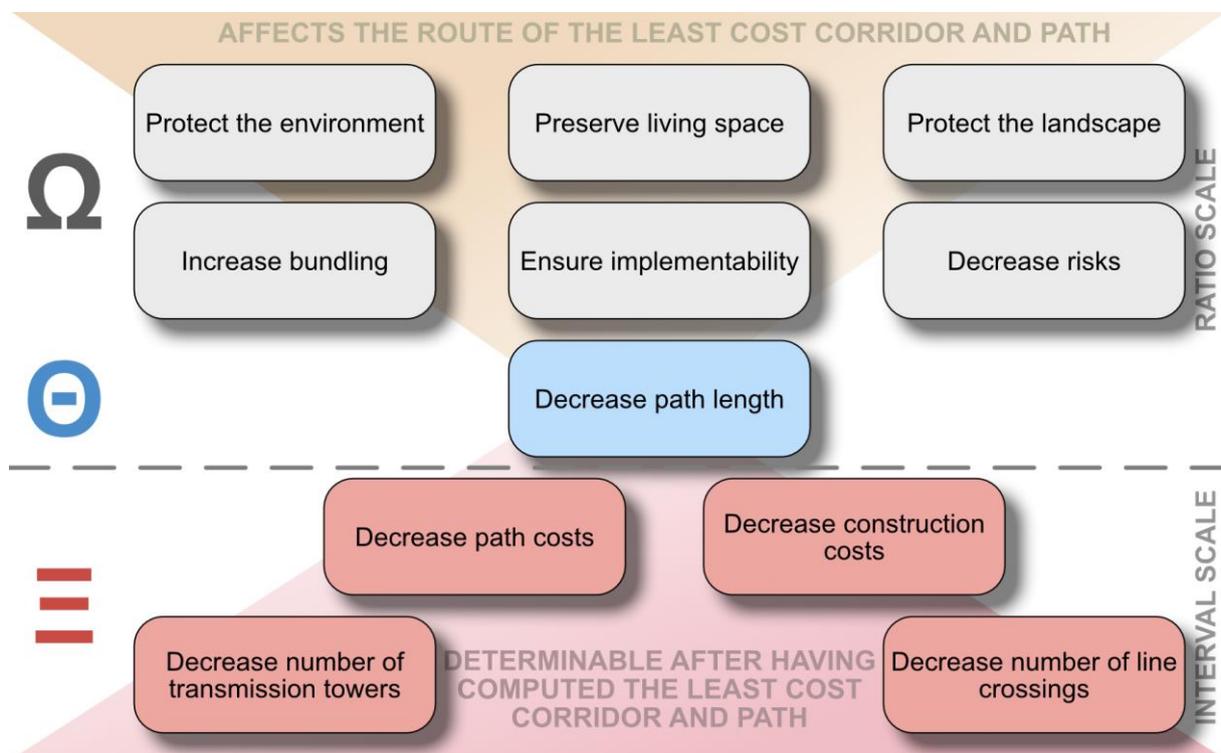


Abbildung 2: Struktur der Ziele, aus denen sich für jedes Ziel ein Indikatorwert ergibt.

<sup>2</sup>  $\Theta$  kann direkt beeinflusst werden, wenn wie bei  $\Omega$  ein Parameter existiert, der ihn steuert und als Gewicht verwendet (z.B. wird der least cost path in gebirgigen Gebieten durch den valleyiness-Parameter (Schito, Moncecchi, und Raubal 2020) dazu angehalten, sich an den Tälern zu orientieren und diesen zu folgen).

<sup>3</sup> Wenn  $\Theta$  nicht direkt beeinflusst werden kann (z.B. bei einem Erdkabel in einem städtischen Gebiet), so ergibt sich der Indikator aus der Realisierung des least cost path ohne dass ein anderer Parameter ihn gezielt beeinflusst. In diesem Fall fällt  $\Theta$  aus der Auswahlliste des Wizards.

## 2.3 MCDA-Theorie: Modellierungsansätze

Grundsätzlich gibt es zwei Denkweisen, wie durch die Anwendung von MCDA ein für einen bestimmten Sachverhalt optimales Gebiet ermittelt werden kann. Diese Unterscheidung und die dabei angewandten Techniken werden von Malczewski und Rinner (2015) in Bezug auf Geographische Informationswissenschaften, von Belton und Stewart (2002) unter dem Blickwinkel des Operations Research und von Schito (2020) in Bezug auf die Modellierung von Hochspannungsleitungen im Detail beschrieben.

Da in dieser Hinsicht *Attribute* als wesentliches Unterscheidungsmerkmal dienen, definieren wir zuerst, was ein *Attribut* ist:

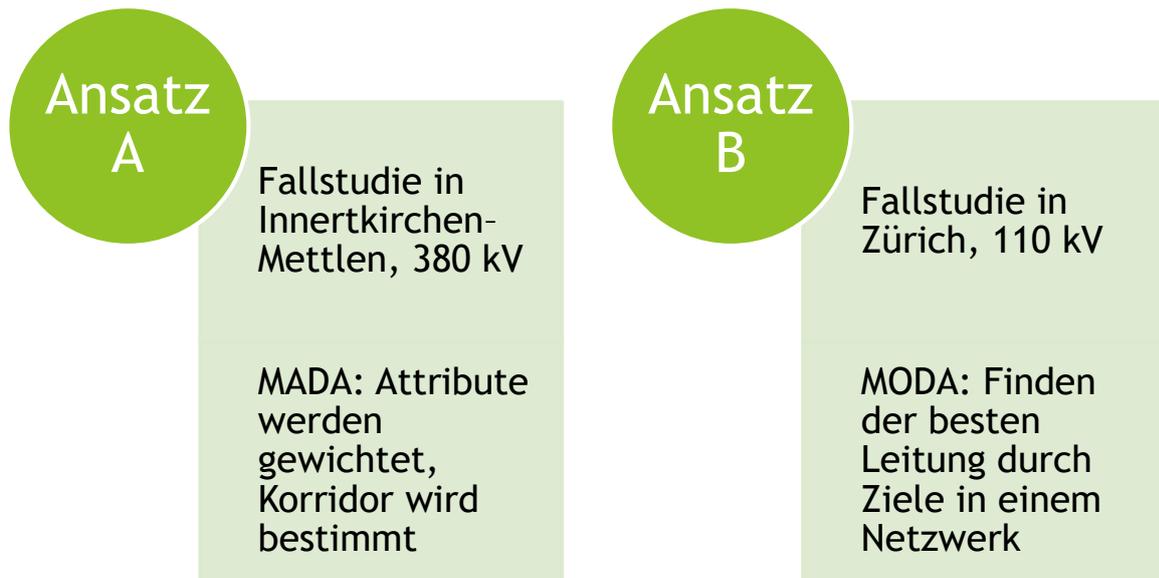
**Ein Attribut ist eine klar definierte, kategorisierbare oder quantifizierbare Eigenschaft eines Objekts.  
(z.B. Bodenbedeckung = {See | Wald | Fels})**

Diese beiden grundsätzlichen MCDA-Ansätze sind:

- **Multi-Attribute Decision Analysis (MADA):** Bei MADA wird die geeignetste Alternative durch den Vergleich verschiedener Attribute ermittelt. Diese Attribute sind explizit definiert, d.h., es ist klar ersichtlich, welche Attribute über welche Formeln zur Berechnung einer Gesamteignung beitragen.
- **Multi-Objective Decision Analysis (MODA):** Bei MODA wird die geeignetste Alternative dadurch gefunden, dass das Entscheidungsmodell durch constraints eingeschränkt und über eine Zielfunktion eine (Pareto-)optimale Lösung gefunden wird. Attribute werden implizit über die Zieldefinitionen angesteuert. Die constraints und Zielfunktion sind jedoch explizit definiert.

Das ursprüngliche MADA/MODA-Konzept von Hwang und Yoon (1981) sieht vor, dass MADA dann zur Findung der optimalen Alternative angewendet wird, wenn alle Alternativen bekannt sind. Das ist z.B. bei einem Autokauf der Fall, bei dem eine Entscheidungsträgerin sich aus einer Menge von 10 Autos für das geeignetste Auto entscheiden muss und dabei Attribute wie z.B. die Farbe, die Maximalgeschwindigkeit oder der Benzinverbrauch miteinander vergleicht und gegeneinander abwägt. Hingegen sieht die klassische MCDA-Theorie bei MODA vor, das Design eines optimalen Produkts hinsichtlich mehrerer konkurrierender Ziele zu unterstützen. Beispielsweise entsteht ein neues Automodell dadurch, dass der Hersteller versucht, ein möglichst günstiges, aber energieeffizientes Auto mit maximalem Komfort herzustellen.

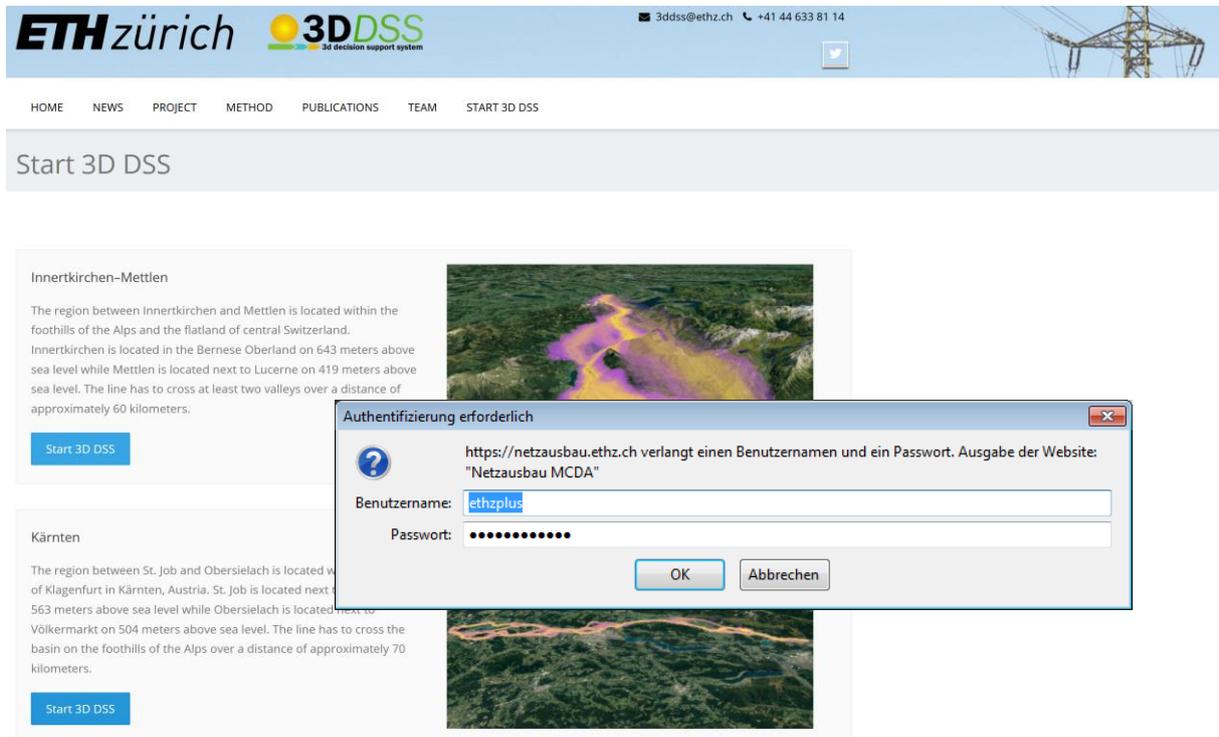
Diese klassische Betrachtung von MCDA kann jedoch nicht 1:1 auf räumliche Probleme angewendet werden. Beim Arbeiten mit Geographischen Informationssystemen (GIS) beinhalten die Daten zwar explizit definierte Attribute, jedoch müssen die Alternativen meist noch generiert werden. Aus diesem Grund wird im vorliegenden Projekt MCDA wie folgt eingesetzt:



- **Ansatz A:** Anhand der vorliegenden Daten definieren die Stakeholder ein Szenario. Daraus werden die Gewichtungen ermittelt, mit denen die Attribute gewichtet werden. Durch die Anwendung von **MADA** lässt sich der optimale Korridor für dieses Szenario bestimmen.
- **Ansatz B:** Unterschiedliche Stakeholder haben unterschiedliche Zielvorstellungen. Wurden mehrere Alternativen generiert, wird **MODA** angewendet, um durch das Definieren von constraints und unterschiedlichen Zielfunktionen eine (Pareto-)optimale Alternative (oder eine Pareto-Front) zu bestimmen, welche diese Bedingungen bestmöglich erfüllt.

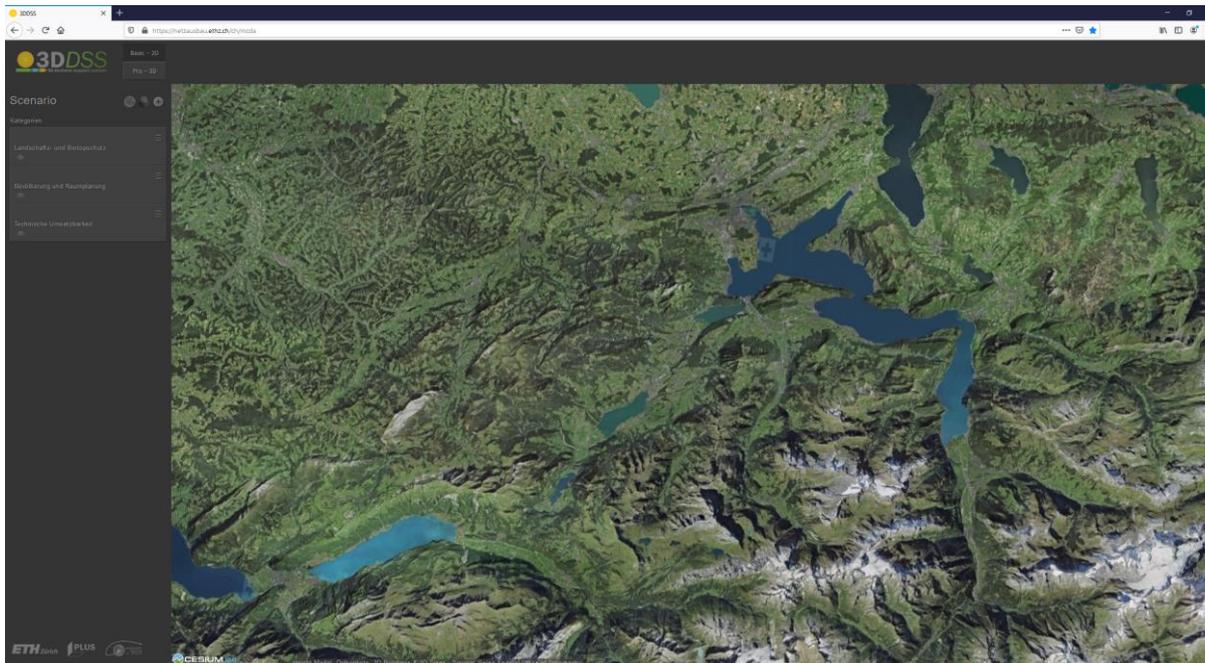
### 3 Technische Anmerkungen

Das 3D DSS ist in einer Web-Plattform integriert. Öffnen Sie einen Browser und rufen Sie die Webseite <https://3ddss.ethz.ch> auf. Klicken Sie nun auf das Feld «Start 3D DSS» und geben Sie den Benutzernamen und das Passwort ein, um das 3D DSS zu starten.



## 4 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche gliedert sich in 5 Bereiche, in denen unterschiedliche Aktionen möglich sind. Auf der linken Seite befindet sich der Bereich «Scenario», in dem die Modellierungen zur Berechnung von Raumwiderständen, Planungsgebieten und Korridoren gestartet werden. Darunter sind die relevanten räumlichen Faktoren aufgeführt, welche in Kategorien gegliedert sind. Die räumlichen Karten der Faktoren sowie die Modellierungsergebnisse werden im Viewer auf der rechten Seite angezeigt. Im oberen Bereich der Webseite befinden sich Schaltflächen zum Wechseln zwischen der Anzeige im 2D- oder im 3D-Modus. Sobald der 3D-Modus aktiviert ist, erscheinen weitere Schaltflächen zur Veränderung der Darstellung von Inhalten im Viewer, zum Einblenden weiterer Informationsebenen und 3D-Objekten sowie zum Editieren von 3D-Objekten und Flächen.



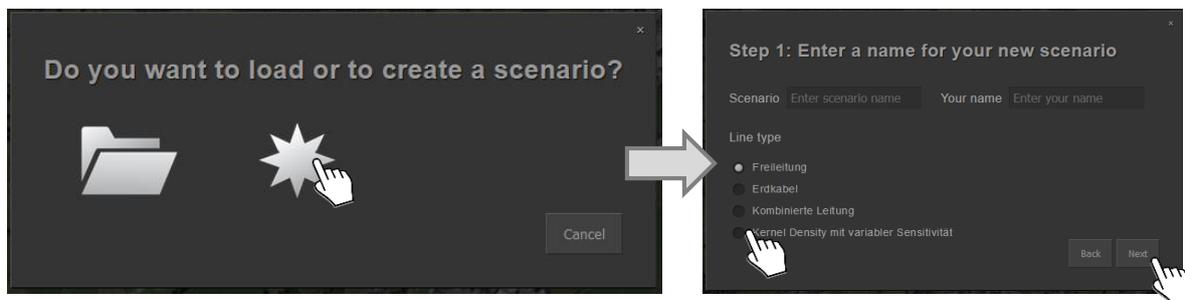
2D / 3D	Anzeigen & Editieren
Szenario modellieren und anzeigen:  Raumwiderstand Planungsgebiet Korridor	Viewer / 3D-Visualisierung
Faktoren: Landschafts- und Bio- topschutz  Bevölkerung und Raumplanung  Technische Umsetzbarkeit	

## 5 Einsatz: Schritte und Funktionen

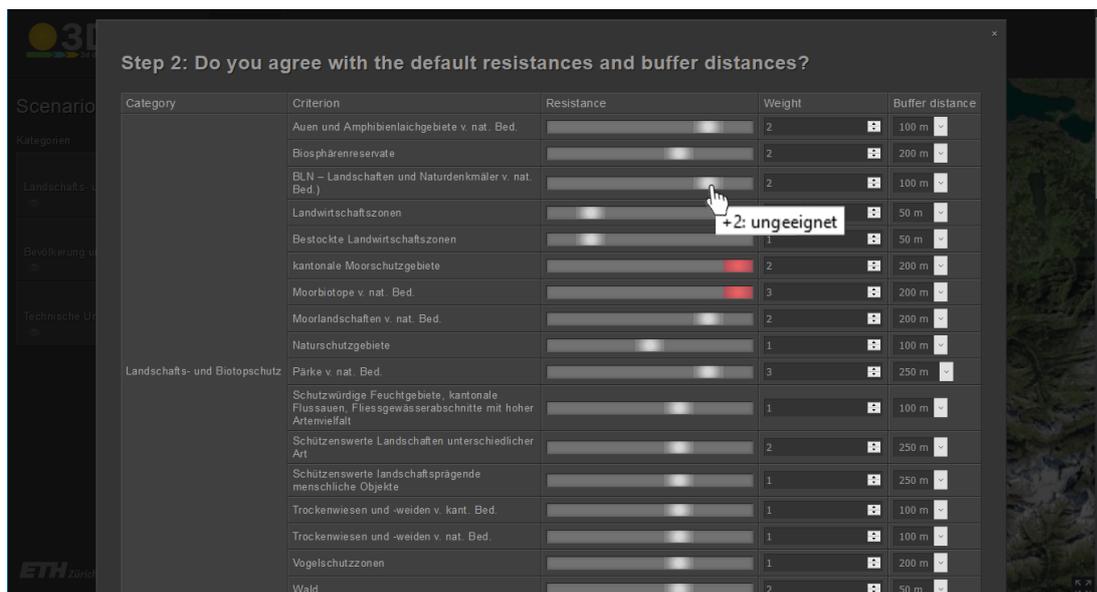
In diesem Kapitel wird der Einsatzablauf des 3D DSS erläutert und die einzelnen Schritte detaillierter vorgestellt. Grundsätzlich erfolgen zunächst die Einstufung der Widerstände sowie die Gewichtung von Faktoren, mit denen der Raumwiderstand für den Bau von Leitungen im Planungsraum berechnet wird. Auf dieser Basis werden dann das Planungsgebiet und der Korridor modelliert. Ein Szenario-Wizard führt durch die nötigen Schritte.

### 5.1 Neues Szenario erstellen

Durch Mausklick auf das Feld mit dem «PLUS-Zeichen»  wird der Szenario-Wizard gestartet. Um ein neues Szenario zu erstellen, wird auf den Stern geklickt. Es öffnet sich ein neues Fenster, in dem zunächst der Name für das Szenario und der Name des Erstellers eingetragen wird. Zudem wird ausgewählt, welcher Leitungstyp berechnet werden soll: überall Freileitungen, überall Erdkabel oder eine kombinierte Leitung aus Freileitungen und Erdkabeln. Durch diese Auswahl wird der jeweilige Algorithmus bestimmt, der für die Modellierung verwendet wird.



Durch Mausklick auf «Next» gelangt man zum zweiten Schritt, in dem eine Übersicht der Faktoren, inklusive der zugewiesenen Widerstände und Gewichtungen sowie gewählten Distanzen für die Pufferung, aufgelistet sind. Dies sind Standardeinstellungen, die zusammen mit Experten bezüglich geltenden gesetzlichen Vorgaben abgeglichen wurden.



## 5.2 Widerstand der Faktoren definieren und Faktoren gewichten

### 5.2.1 Funktionsprinzip

#### Widerstand definieren

Das Planungsgebiet und ein möglicher Korridor in diesem Gebiet werden anhand virtueller *Raumkosten* berechnet. Als *Raumkosten* werden Einflüsse definiert, die für den Bau einer Leitung aufgewendet werden müssen. Diese Einflüsse beschränken sich nicht nur auf Geldinvestitionen; zusätzlich werden Einflüsse mitberücksichtigt, die der Bau der Masten und der Betrieb der Leitung auf Mensch, Landschaft, Natur und Umwelt haben.

Im Gegenzug bedeutet dies, dass Gebiete unterschiedlich starke Widerstände gegen den Bau einer Leitung aufweisen. Grundsätzlich ist dieser Widerstand in besonders schützenswerten, landschaftlich schönen, sensiblen Gebieten hoch, während Gebiete ohne besondere Schutzwirkung einen geringen Widerstand haben. Im 3D DSS werden diese Widerstände von den Nutzern für jeden Einflussfaktor festgelegt und eingegeben. Dabei wird folgende *Widerstandsskala* mit aufsteigendem Widerstandswert verwendet und auf Gebiete angewendet, die diesem Einflussfaktor unterliegen:

Tabelle 1: Widerstandsskala

Widerstand	Bedeutung
0	Zone wird nicht berücksichtigt (gehen Sie mit dieser Einstellung vorsichtig um)
-2	Zone ist für Leitungen <b>geeignet</b>
-1	Zone ist für Leitungen <b>weitgehend geeignet</b>
0	Zone ist für Leitungen <b>neutral</b> (es ist egal, ob die Leitung hier durchgeht oder nicht)
+1	Zone ist für Leitungen <b>weitgehend ungeeignet</b>
+2	Zone ist für Leitungen <b>ungeeignet</b>
∞	Zone für Leitungen verboten (gehen Sie mit dieser Einstellung vorsichtig um)

#### Gewichtung der Faktoren

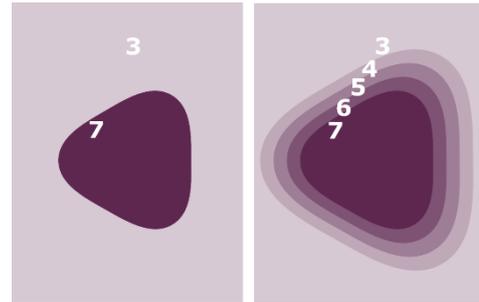
Die Widerstandsskala wird durch folgende *Gewichtungsskala* ergänzt, die es dem Nutzer erlaubt, einzelne Faktoren nach den persönlichen Interessen zu gewichten. Eine hohe Gewichtung verleiht einem Faktor im Vergleich zu den anderen Faktoren einen höheren Einfluss auf die Berechnung der Gesamtwiderstände. Wird jedoch als Widerstand «neutral = 0» gewählt, erfolgt keine Gewichtung des Faktors.

Tabelle 2: Gewichtungsskala

Gewichtung	Bedeutung
1	Neutral
2	Wichtig
3	Sehr wichtig

### Pufferdistanzen

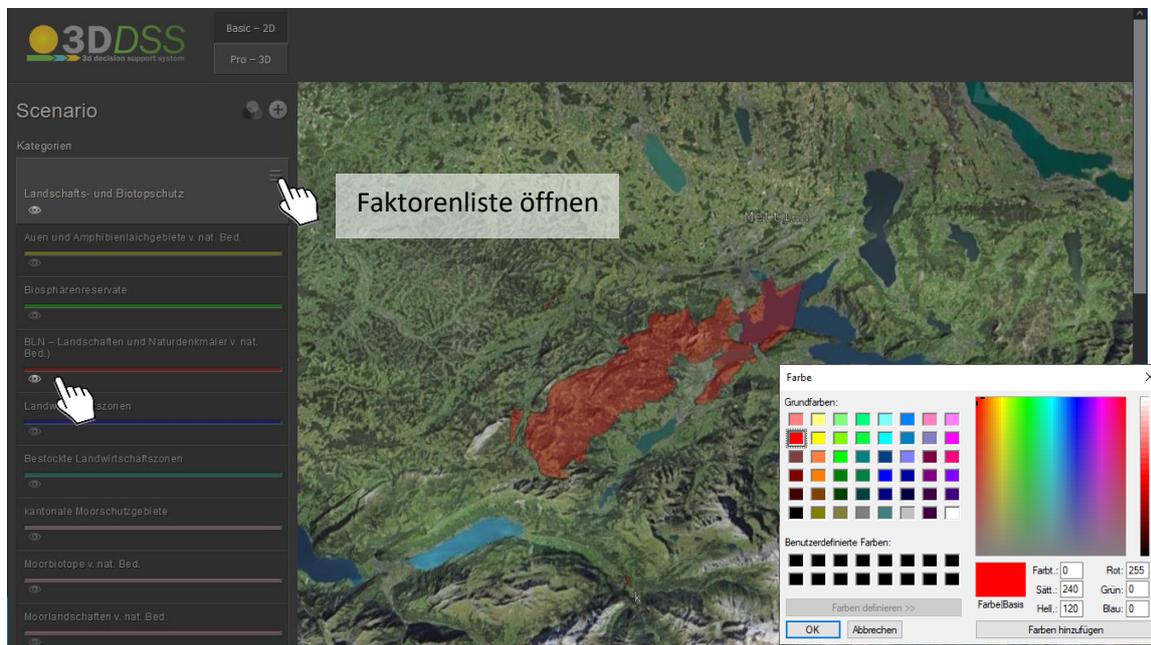
Für die räumliche Begrenzung der Polygone eines Faktors können verschiedenen räumliche Begrenzungsmodellen verwendet werden. In der Beispielgrafik weist eine Kernzone den Raumwiderstand 7 und das umliegende Gebiet den Raumwiderstand 3 auf. Diese Abgrenzung kann, wie im Fall links, trennscharf sein. Eine trennscharfe Abgrenzung ist jedoch nicht in jedem Fall sinnvoll, da eine schützenswerte Zone eine (abnehmende) Schutzwürdigkeit über ihre Grenzen hinaus ausstrahlt. Das Modell rechts wird dieser Annahme gerecht, indem Pufferringe gebildet werden, in denen der Raumwiderstand nach aussen schrittweise abnimmt.



Das 3D DSS rechnet jedoch nicht mit Pufferringen, sondern es berechnet den Raumwiderstand anhand des Euklidischen Distanz zur Kernzone unter Berücksichtigung einer linearen Abnahme<sup>4</sup>. Im Experten-Modus des 3D DSS können die Pufferdistanzen aus einer Dropdownliste gewählt werden.

### 5.2.2 Anwendung

Grundsätzlich sollten die Voreinstellungen der Widerstände, Gewichtungen und Pufferdistanzen nicht verändert werden. Sie wurden so definiert, dass sie den Vorgaben der Praxis entsprechen. Es ist jedoch sinnvoll, sich eine Übersicht über die räumliche Verteilung der Faktoren zu verschaffen und zu sehen, wo gegebenenfalls starke Widerstände gegen den Bau von Leitungen in dem Gebiet in Bezug auf einzelne Faktoren sind. Die für das betrachtete Gebiet relevanten Faktoren sind auf der linken Seite der Benutzeroberfläche nach Kategorien zusammengestellt.



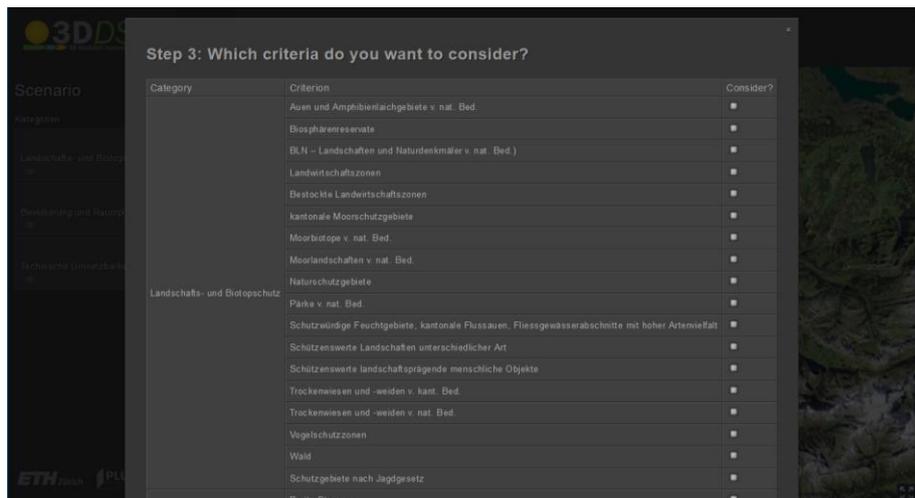
Durch Klick auf das Listen-Symbol  wird die Liste mit den einzelnen Faktoren geöffnet. Mit Klick auf das Augen-Symbol  kann die räumliche Ausbreitung der Faktoren im Viewer (rechte Seite) angezeigt werden. Die Farbe der Informationsebene kann angepasst werden, indem mit dem Cursor auf die

<sup>4</sup> Die lineare Abnahme wurde in einer Vorstudie von praktisch allen Experten bevorzugt, siehe Schito (2020).

graue Fläche der Navigationsleiste unterhalb der farbigen Linie geklickt wird. Dies öffnet eine Farbpalette, aus der eine neue Farbe ausgewählt werden kann.

Im gezeigten Beispiel werden BLN-Gebiete (Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung) im Untersuchungsraum aufgezeigt. Diese haben einen hohen Wert für den Raumwiderstand (hier: +2 = Zone ist für Leitungen ungeeignet) gegen den Bau von Leitungen (s. Liste der Faktoren im Szenario-Wizard). Diesem Faktor wurde zudem ein hohes Gewicht zugewiesen.

Geht man im Szenario-Wizard einen Schritt weiter, kommt nochmals die Liste der Faktoren in den drei Kategorien. Hier geht es nun um die Frage, welche der Faktoren in die Modellierung einbezogen werden sollen. Als Standard sind alle Faktoren ausgewählt. Dies sollte im Normalfall so gelassen werden, da alle diese Faktoren bei der Planung von Leitungen zu berücksichtigen sind. Für spezielle Szenarien können jedoch Faktoren abgewählt werden («Experten-Modus»).



Der vierte Schritt im Szenario-Wizard ist der erste aktive Schritt. Hier geht es darum zu entscheiden, wie wichtig die im Kapitel 2.2 beschriebenen Ziele sind. Legen Sie anschliessend auf der 21-stufigen Skala fest, wie wichtig Ihnen die in der Abbildung 3 aufgeführten Ziele sind.

**Reflektieren Sie diesen Schritt genau, indem Sie abwägen, wie viel wichtiger Ihnen das Erreichen eines Ziels im Gegensatz zu einem anderen ist.**

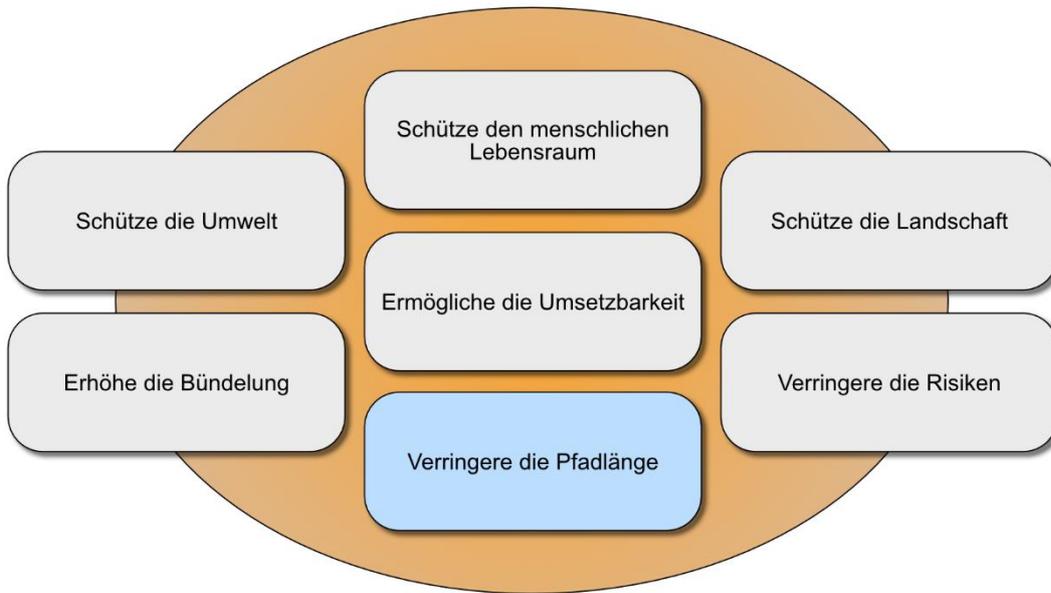
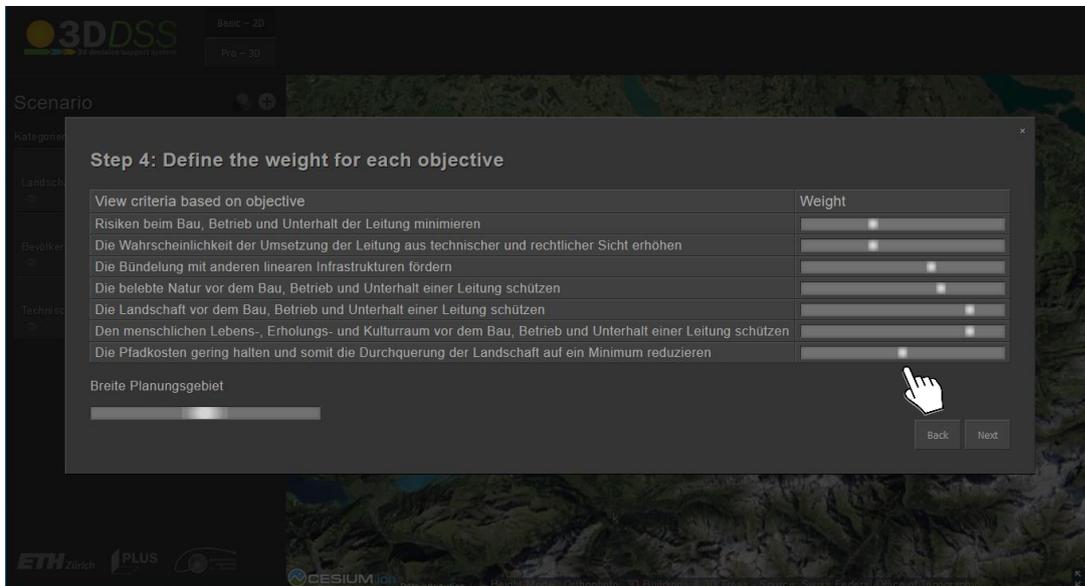


Abbildung 3: Ziele, die im Szenario-Wizard gewichtet werden können. Die sechs ockerfarbenen Ziele haben in der MCDA immer einen direkten Einfluss auf den Verlauf des Korridors während das blaue Ziel von den Modellvoraussetzungen abhängt und dessen Indikator anders berechnet wird (siehe Kapitel 2.2). Für jedes Ziel wird jeweils ein Indikatorwert berechnet.



Die Breite des Planungsgebiets wird über eine 9-stufige Skala gesteuert (siehe Tabelle 3). Die Stufen beruhen auf statistischen Werten, welche die Breite des Planungsgebiets steuern. Im Prinzip sind es die Anzahl an Standardabweichungen – gemessen an der Verteilung der Kosten pro Zelle für die ganze Kostenoberfläche. Je höher die Stufe gewählt wird, desto breiter wird das Planungsgebiet.

**Die Breite des Planungsgebiets wird dadurch gesteuert, indem Sie festlegen, wie viele zusätzliche Raumkosten Sie gegenüber der Ideallösung in Kauf nehmen möchten.**

Tabelle 3: Breite Planungsgebiet

Stufe	Breite Planungsgebiet
1	Sehr schmal
2	Schmal
3	Mässig
4	Breit
5	Sehr breit



Im fünften Schritt ist die Option vorbereitet, weitere Szenarien in die Modellierung mit einzubinden, um ein optimiertes Szenario zu berechnen. Diese Funktion ist jedoch momentan nicht verfügbar. Sobald auf das Feld «Finish» geklickt wird, startet die Berechnung des neuen Szenarios gemäss den gewählten Einstellungen.

**Wichtig: zu beachten**

Obwohl die Widerstände und Gewichtungen der Faktoren sowie die Pufferdistanzen bereits voreingestellt sind, lassen sie sich individuell verändern («Experten-Modus»). Zu beachten ist jedoch, dass bei Faktoren, die bezüglich der Schutzwürdigkeit eine besondere Rolle einnehmen, es nicht sinnvoll ist, niedrige Widerstandswerte zu wählen. Ein Beispiel sind Moore: Da 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 sinnvoll, ihnen einen geringen Widerstand zuzuweisen.

**Seien Sie vorsichtig bei der Wahl der höchsten Widerstandsstufe «verboten», weil dies dazu führen kann, dass keine Lösung ermittelt werden kann.**

Faktoren, die als «verboten» gekennzeichnet wurden, werden als unpassierbare Sperrgebiete betrachtet. Umgekehrt verzerren Faktoren, die als «nicht berücksichtigt» gekennzeichnet wurden, möglicherweise eine realitätsgetreue Modellierung – vor allem dann, wenn sie berücksichtigt werden sollten. Faktoren nicht zu berücksichtigen ist aber nicht per se schlecht: Beispielsweise können S1-Grundwasserschutzzonen im Falle einer Freileitung meist problemlos überspannt oder so umgangen werden, dass kein Mast in dieser Zone platziert werden muss. Zudem erhöht das Weglassen eines oder mehrerer Faktoren das Gewicht der restlichen Faktoren derselben Kategorie. Aus diesen Gründen sollten diese beiden speziellen Kennzeichnungen nur in begründeten Fällen und mit Bedacht eingesetzt werden.

Grundsätzlich gilt, dass die Raumwiderstände und die gesetzlichen Hürden für den Bau der Masten höher liegen als für die Überspannung eines Gebietes. Mit dem 3D DSS wird jedoch nach einem idealen Planungsgebiet, bzw. einem idealen Korridor gesucht, und damit die Leitung als Ganzes betrachtet. Das Programm ist aber so gestaltet, dass der Bau von Masten für folgende Gebiete aus gesetzlichen oder technischen Gründen automatisch verunmöglicht wird:

Tabelle 4: Restriktionen zum Bau von Masten

Baurestriktionen	Begründung
Moorbiotope	Gesetzlich geregelt
S1-Grundwasserschutzzonen	Gesetzlich geregelt
Gletscher	Technisch und wirtschaftlich zu riskant
Gebiete mit einer Steigung über 80°	Technisch nicht umsetzbar

Diese Einschränkungen müssen jedoch nicht bedeuten, dass diese Gebiete nicht überspannt werden dürfen. Deshalb ist es wichtig, bei der Bewertung der Faktoren die Leitung als Ganzes zu betrachten.

### 5.3 Modellierung von Übertragungsleitungen durch den Ansatz A

Ein Modus, wie das 3D DSS den optimalen Korridor berechnet, stützt sich auf den *Ansatz A* (siehe Kapitel 2.3). Beim *Ansatz A* werden – so wie bisher beschrieben – einzelne **Attribute** gewichtet und zu einer totalen Kostenoberfläche aufsummiert, von der dann der Korridor und der least cost path abgeleitet werden. In unseren Studien sind wir dabei von einer **380 kV-Leitung (Höchstspannung)** in der Region **Innertkirchen-Mettlen** ausgegangen, die als Freileitung, als Erdkabel oder als kombinierte Leitung gebaut werden kann.

#### 5.3.1 Raumwiderstand berechnen

##### *Funktionsprinzip der Gewichtung*

Wie im Kapitel 5.2.1 erwähnt, verleiht eine hohe Gewichtung einem Faktor im Vergleich zu den anderen Faktoren einen höheren Einfluss auf die Berechnung der Gesamtwiderstände.

**Ein hohes Gewicht begünstigt bei niedrigen Raumwiderständen das Anziehen der Leitung während es bei hohen Raumwiderständen stärker abstossend wirkt.**

- Bei niedrigen Widerständen (-2 oder -1) führt ein Gewicht grösser als 1 dazu, dass der Anteil des Faktors an den gesamten Raumkosten niedriger wird.
- Bei einem neutralen Widerstand (0) führt ein Gewicht grösser als 1 zu keinem Effekt.
- Bei hohen Widerständen (+1 oder +2) führt ein Gewicht grösser als 1 dazu, dass der Anteil des Faktors an den gesamten Raumkosten grösser wird.

##### *Grundsätzliches Funktionsprinzip der MCDA*

Für die Berechnung des totalen Raumwiderstands wird die sogenannte *weighted linear combination* angewendet. Dabei werden die Faktoren, die im vorigen Schritt bewertet und gewichtet wurden, miteinander zu einer Summe verrechnet. Dies erfolgt auf Basis von Rasterdatensätzen, die für jeden Faktor räumlich explizite Werte für Rasterzellen mit einer Grösse von einer Hektare aufweisen. Da wir von Widerständen gegen den Bau einer Leitung ausgehen, sind Zellen mit hohen Widerstandswerten («Kosten») für den Bau ungeeignet, wohingegen Zellen mit geringen aufsummierten Widerstandswerten besser geeignet sind.

*Weighted linear combination* ist die einfachste, klassischste Methode der Verrechnung. Der totale Raumwiderstand pro Rasterzelle berechnet sich dabei aus der Summe der einzelnen Widerstände in Abhängigkeit ihrer Gewichtung. Das heisst, dass grundsätzlich folgende Formel angewendet wird:

$$t_x = \sum_{i=1}^n w_i \cdot r_{i,x}$$

Formel 1: Weighted linear combination (einfache Formel).

wobei  $i$  der jeweilige Faktor,  $n$  die Anzahl aller Faktoren,  $t_x$  der totale Raumwiderstand an der Stelle  $x$ ,  $w_i$  die Gewichtung des Faktors  $i$ , und  $r_{i,x}$  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.**

### Korrektur durch Einbezug der Nutzenfunktion

Im Detail ist die Berechnung des Raumwiderstands  $t_x$  jedoch komplexer, da einige Korrekturen angebracht werden müssen. Beispielsweise wurde der Hang zum Risiko bzw. zur Risikoaversion mitmodelliert, indem die vier in Abbildung 4 dargestellten Nutzenfunktionen<sup>5</sup> ins 3D DSS integriert wurden. Diese vier Formeln wurden empirisch ermittelt und lauten für den Wertebereich  $-2 \leq x \leq 2$ :

$$z_{1i,x}(r_{i,x}) = r_{i,x} + 3$$

$$z_{2i,x}(r_{i,x}) = \frac{0.575}{\sqrt{|r_{i,x} - 3| + 1}} \cdot 3(r_{i,x} - 3)$$

$$z_{3i,x}(r_{i,x}) = \sqrt{6 \cdot r_{i,x} - 5}$$

$$z_{4i,x}(r_{i,x}) = \frac{r_{i,x}^2}{6} - \frac{5}{6}$$

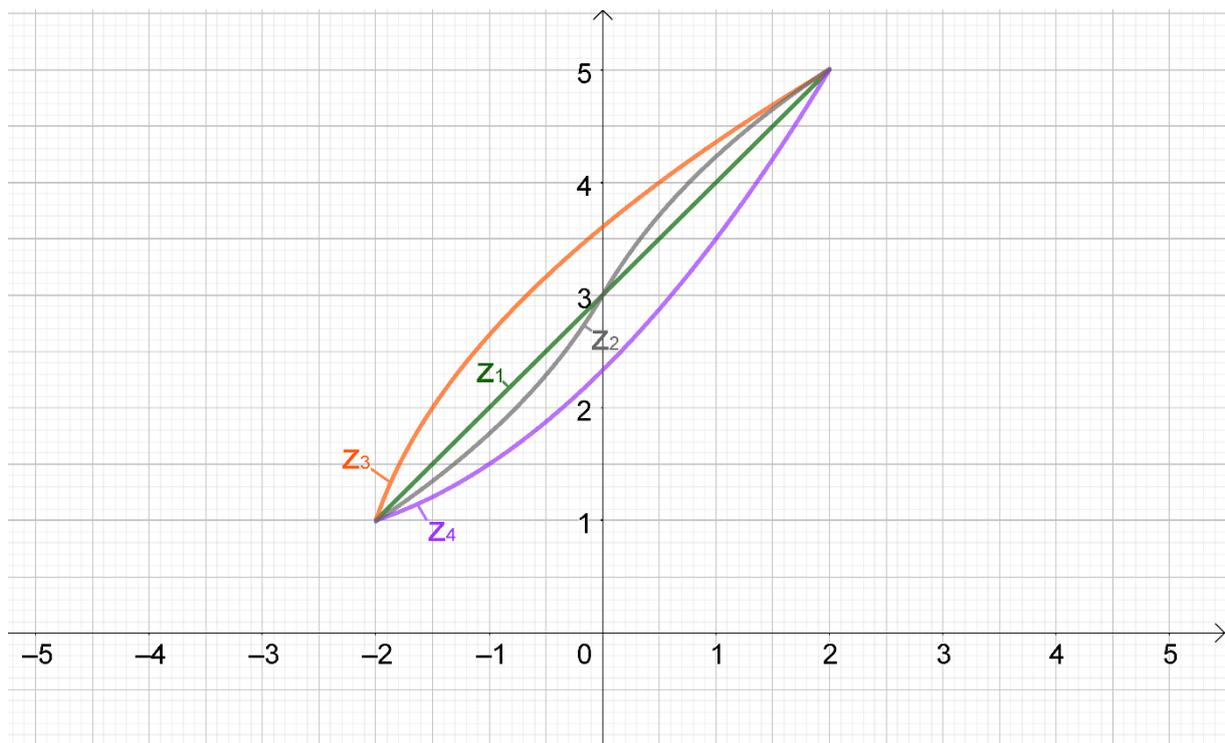


Abbildung 4: Vier Nutzenfunktionen, die das 3D DSS berücksichtigt.

<sup>5</sup> Der Effekt dieser vier Nutzenfunktionen wurde im Paper von Schito u.a. (2018) im Detail untersucht.

### Korrektur durch Einbezug des Gewichtungmodells

Zudem musste gewährleistet werden, dass die Gewichtung  $w_{i,x}$  einen verstärkenden Effekt auf positive als auch für negative Werte hat. Dies wurde durch Einbezug folgender drei empirisch ermittelter Gewichtungsmodele<sup>6</sup> umgesetzt:

$$h_{1,c}(z_m(r_{i,x}), w_i) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{w_i}} \cdot z_m(r_{i,x}), & \forall \{z_m(r_{i,x}) \in \mathbb{R} \mid -2 \leq z_m(r_{i,x}) < 0\} \\ \sqrt[7]{w_i} \cdot z_m(r_{i,x}), & \forall \{z_m(r_{i,x}) \in \mathbb{R} \mid 0 \leq z_m(r_{i,x}) \leq 2\} \end{cases}$$

$$h_{2,c}(z_m(r_{i,x}), w_i) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{w_i}} \cdot z_m(r_{i,x}), & \forall \{z_m(r_{i,x}) \in \mathbb{R} \mid -2 \leq z_m(r_{i,x}) < 0\} \\ \sqrt[10]{w_i} \cdot z_m(r_{i,x}), & \forall \{z_m(r_{i,x}) \in \mathbb{R} \mid 0 \leq z_m(r_{i,x}) \leq 2\} \end{cases}$$

$$h_{3,c}(z_m(r_{i,x}), w_i) = z_m(r_{i,x}) + \frac{\text{sgn}(z_m(r_{i,x})) \cdot (w_i - 1)}{4}$$

Bei den Formeln  $h_{1,c}$  und  $h_{2,c}$  wird der Wertebereich zwischen positiven und negativen Zahlen unterschieden, um der Voraussetzung gerecht zu werden, dass das Gewicht sowohl positive als auch negative Werte verstärken soll. Aus diesem Grund werden positive Werte erwartungsgemäss desto mehr erhöht, je höher das Gewicht ist. Hingegen werden negative Werte verstärkt, indem sie mit höherem Gewicht zunehmend verringert werden. Bei der Ermittlung der Formeln wurde darauf geachtet, dass der Widerstand gegenüber dem Gewicht Priorität hat. So führt auch das höchste Gewicht aus der diskreten Menge  $w_i \in \{1, 2, 3\}$  nicht dazu, dass der nächst stärkere Widerstand geringer ausfallen würde. Somit behält das Gewicht seinen verstärkenden Charakter, ohne dass sich die Wertebereiche in Abhängigkeit der Widerstände überlappen würden. Aus diesem Grund wurde jeweils eine Wurzelfunktion mit den beschriebenen Wurzelexponenten angewendet.

### Korrigierte Formel zur Berechnung der Kostenoberfläche

Nun werden die Formeln der Nutzenfunktionen  $z_m \in \{z_1, z_2, z_3, z_4\}$  und der Gewichtungsmodele

$h_n \in \{h_1, h_2, h_3\}$  in die Formel 1 eingebracht, indem  $z_{m,i,x}$  den Widerstand  $r_{i,x}$  und  $h_{n,c}(z_m(r_{i,x}), w_i)$  die Gewichtung  $w_i$  ersetzt. Die erweiterte Formel lautet:

$$t_x = \sum_{i=1}^n h_{n,c}(z_m(r_{i,x}), w_i) \cdot z_{m,i,x}$$

Formel 2: Weighted linear combination (erweiterte Formel).

Das gesamte Verfahren zur Berechnung der Kostenoberfläche mitsamt den genauen Definitionen ist in der Dissertation von Schito (2020) im Detail beschrieben. Die Schritte, die von der Formel 1 zur Formel 2 führen, sind mitsamt der Begründung im Paper von Schito u.a. (2018) aufgeführt.

<sup>6</sup> Der Effekt dieser drei Gewichtungsmodele wurde im Paper von Schito u.a. (2018) im Detail untersucht.

### 5.3.2 Planungsgebiet berechnen

#### *Funktionsprinzip*

Die Basis der Berechnung des Planungsgebiets bildet die Raumwiderstandskarte, welche auch als *Kostenoberfläche* bezeichnet wird. Auf dieser Kostenoberfläche werden nun Start- und Endpunkt festgelegt, um zu berechnen, wie hoch die Raumkosten minimal sind, um vom Start zum Ende und vom Ende zum Start<sup>7</sup> zu gelangen. Dabei wird der Dijkstra-Algorithmus (Dijkstra 1959) angewendet, bei dem die Raumkosten benachbarter Zellen miteinander verglichen werden, wobei die günstigste Verbindung gewinnt und der Lösungsmenge hinzugefügt wird. Diese Prozedur wird einmal ausgehend vom Start und einmal vom Ende aus durchgeführt.

Als Resultat ergeben sich zwei Karten (eine ausgehend vom Start und die andere vom Ende), die pro Zelle die minimalen aufsummierten Kosten darstellen, die aufgewendet werden müssen, um einen bestimmten Punkt vom Start oder vom Ende aus zu erreichen. In einem letzten Schritt werden diese beiden Karten zu einer sogenannten *Globalen Kostenoberfläche* aufsummiert. Diese Karte stellt dar, wie teuer das Durchqueren einer bestimmten Rasterzelle ist, wenn der Start mit dem Ende verbunden werden soll. Von dieser Karte kann sowohl ein Korridor als auch der least cost path abgeleitet werden<sup>8</sup>.

Daraus folgt, dass jede Kostenoberfläche bereits eine Ideallösung besitzt, die als *least cost path* bezeichnet wird. Alle Zellen, die von dieser Ideallösung abweichen, weisen höhere Kosten auf. Es darf angenommen werden, dass Zellen, die in der Nähe des least cost paths liegen, günstiger zu durchqueren sind als Zellen, die weit von ihm entfernt liegen. Das Planungsgebiet ist laut dieser Auffassung demnach der Bereich, der sich aus der Bereitschaft ergibt, gegenüber der Ideallösung einen bestimmten Betrag an Mehrkosten aufzuwenden.

#### *Breite des Planungsgebiets*

Da die Raumkosten abstrakt sind und sich ihre Verteilung je nach Einstellung und MCDA-Methode ändert, wurde als Steuerungseinheit die Standardabweichung der Kostenverteilung aller Zellen gewählt. Dies kann dazu führen, dass die effektive Breite des Planungsgebiets und die ausgegebene Anzahl an Zellen für denselben Wert der Planungsgebietsbreite bei unterschiedlichen MCDA-Modellen oder Szenarien stark variieren können.

---

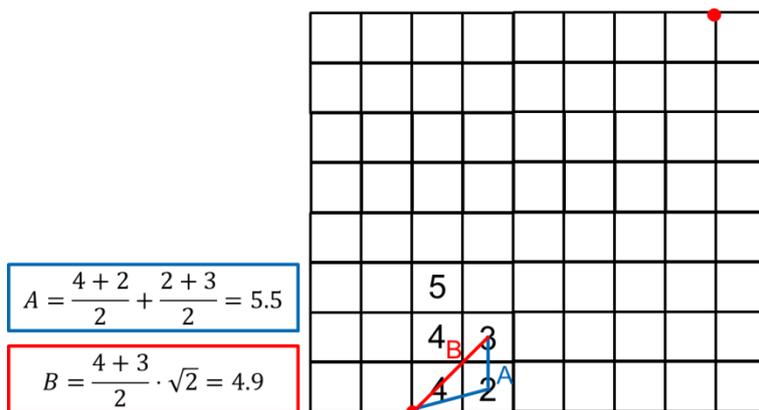
<sup>7</sup> In einer vergangenen Version wurden beide Wege berechnet, da der least cost path für beide Wege nicht immer identisch ist. Da die Unterschiede relativ irrelevant sind, wurde in der aktuellen Version nur der Weg vom Start zum Ziel bestimmt.

<sup>8</sup> Wobei es für die Bestimmung des least cost paths genügen würde, die Pfadkosten ausgehend vom Start- zum Zielpunkt zu haben.

### 5.3.3 Korridor berechnen

#### Funktionsprinzip

Der Korridor ist ein weiteres Ergebnis der least cost path-Modellierung. Der modellierte least cost path repräsentiert gemäss dem gewählten Ansatz den modellhaft idealen Verlauf eines Korridors. Mit der Methode wird ein durchgehender Pfad vom Start zum Ziel berechnet. Dabei wird der Dijkstra-Algorithmus (Dijkstra 1959) angewendet, der von Parzelle zu Parzelle vorgeht und jeweils berechnet, welche Verbindung die geringsten relativen Raumkosten verursacht. Wenn beispielsweise wie in folgender Abbildung die Ausgangszelle einen Wert von 4 hat und die umliegenden Zellen einen Wert von 2, 3 bzw. 4, so ist der diagonale Weg zur Zelle mit dem Wert 3 am günstigsten. Da sich durch dieses parzellenweise Vorgehen meist eine Zickzacklinie ergibt, wird das Resultat anschliessend leicht begradigt.



Diese Lösung zeigt den Bereich an, in dem der Bau einer Leitung gemäss dem gewählten Szenario die geringsten relativen Raumkosten verursacht. Da technische sowie gesetzliche Vorgaben dabei vernachlässigt werden, ist der least cost path abstrakt und in Realität nicht zwangsläufig zur direkten Umsetzung geeignet.

### 5.3.4 Berechnungsmodell der indikativen Baukosten

Basierend auf dem Verlauf des Korridors können zudem die indikativen Baukosten abgeleitet werden. Sie berechnen sich aus einer Baukostenschätzung, bei der keine besonderen Spezialitäten durch Verfahren, Planung oder Erstellung der Leitung berücksichtigt sind. Die Berechnung der indikativen Baukosten stellt eine grobe Schätzung dar, wobei die Preise pro Kilometer berechnet werden – je nachdem, wie schwierig das Terrain zu bebauen ist. Folgende Preise pro Kilometer wurden verwendet:

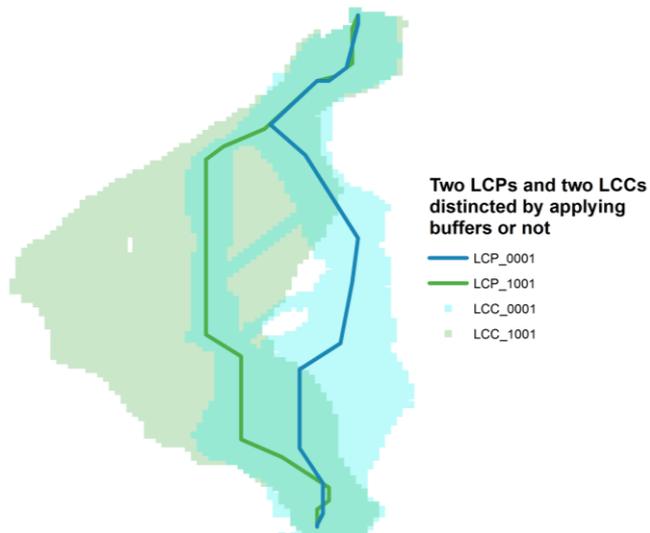
- 2.5 Mio. CHF für ein einfaches Terrain
- 3.0 Mio CHF für ein mässig komplexes Terrain
- 3.5 Mio CHF für ein schwieriges, aufwendiges Terrain

Für die Modellierung, ob ein Segment als einfach, mässig komplex oder schwierig eingestuft wird, wurde zuerst die Rauheit des ganzen Studiengebiets ermittelt. Anschliessend wurde die Steigung und die Höhe an den Orten ermittelt, an denen die Masten stehen sollen. Diese Werte wurden mit der totalen Rauheit verglichen, wobei niedrigere Werte ein einfaches Terrain, ähnliche Werte ein mässig komplexes Terrain und höhere Werte ein schwieriges Terrain darstellen. Die Summe der Länge der Segmente wurde anschliessend mit dem Preis pro Kilometer multipliziert und dann zu den indikativen Baukosten aufaddiert. Diese werden im 3D DSS mit «**monetary\_costs\_rounded**» bezeichnet, während «**path\_costs**» die Summe der virtuellen Raumkosten angibt.

### 5.3.5 Wichtig: zu beachten

Die Abbildung unten zeigt zwei Planungsgebiete («LCC») und ihre dazugehörigen least cost paths («LCP») in grün und in blau. Beide Planungsgebiete wurden mit Simple Additive Weighting (siehe Kapitel 5.3.1) erstellt. Sie unterscheiden sich jedoch aufgrund des gewählten Begrenzungsmodells (siehe Kapitel 5.2.1 «Pufferdistanzen»): Während das blaue Planungsgebiet mit der Endung «0001» trennscharf erstellt wurde, wurde beim grünen Planungsgebiet mit der Endung «1001» eine Pufferung für alle Faktoren hinzugefügt.

Obwohl ein Überlappungsbereich besteht, unterscheiden sich die beiden Lösungen recht stark voneinander. Während die Grösse der Planungsgebiete in etwa gleich ist, ist das grüne Planungsgebiet viel breiter als das blaue. Zudem gibt das blaue Planungsgebiet einige Kanäle an, durch die der Korridor letztlich verlaufen könnte. Interessant ist, dass der grüne Least cost path gänzlich durch ein Planungsgebiet verläuft, das von beiden MCDA-Methoden geteilt wird.



**Der modellierte Least cost path berücksichtigt keine technischen und gesetzlichen Vorgaben. Er zeigt lediglich den ungefähren Verlauf des Korridors an, der bezogen auf die Raumwiderstände am günstigsten ist.**

Zudem sind die berechneten indikativen Baukosten in keinem Fall verbindlich. Sie stellen lediglich eine grobe Erstschatzung der möglichen Kosten dar.

## 5.4 Modellierung von Übertragungsleitungen durch den Ansatz B

Ein zweiter Modus bietet den Nutzern des 3D DSS die Möglichkeit, einen Leitungsverlauf über den *Ansatz B* (siehe Kapitel 2.3) zu identifizieren. Dabei legen die Stakeholder individuell fest, welche Ziele ihnen wichtiger oder weniger wichtig erscheinen. Das 3D DSS erstellt daraus eine gewichtete Zielfunktion, anhand der die optimale Alternative aus einem Pool von bereits berechneten Alternativen identifiziert wird. Für ein einzelnes Szenario wird die optimale Alternative (sofern die Lösungsmenge konvex ist) durch lineare Programmierung erörtert. Der *Ansatz B* verwendet diese Technik, um aus unterschiedlichen Zielvorstellungen eine Menge an Lösungen zu bestimmen, die den Zielvorstellungen möglichst nahe kommen.

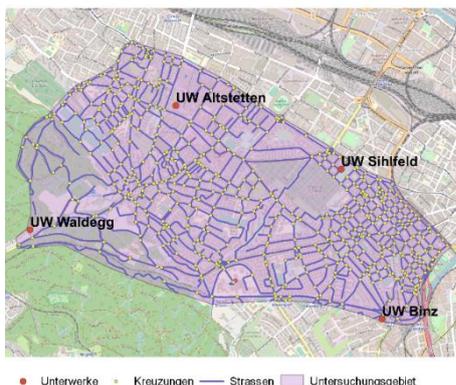
In der aktuellen Version verwendet das 3D DSS den *Ansatz B* dazu, aus einer Menge an möglichen Leitungsverläufen diejenige auszuwählen, welche die Zielvorgaben der Stakeholder am besten erfüllt. Diese Funktion ist derzeit auf **Erdkabelverläufe (Hochspannung)** in der Fallstudie «Stadt Zürich» beschränkt. Zwei weitere Methoden desselben MCDA-Ansatzes wurden zwar implementiert, sind aber nicht über die Standard-Werkzeugpalette des 3D DSS abrufbar (siehe Kapitel 5.6.2 und 5.6.3).

### Hintergrund und Vorbereitung

Da die Hochspannungsleitungen in Zürich nur in öffentlichen Zonen gebaut werden dürfen, beschränkt sich aufgrund der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung<sup>9</sup> (NISV) die Menge an möglichen Orten auf Strassen, Plätze und Grünanlagen. Diese wurden in einem ersten Schritt vom öffentlichen Datensatz der amtlichen Vermessung des Kantons Zürich extrahiert. Zudem wurden die Mittelachsen der Strassen von swissTLM3D (Swisstopo) extrahiert. Von diesem wurden durch Verschnitt alle Kreuzungen ermittelt (Abbildung 5 links).

Da für das neue Unterwerk *Waldegg* eine Verbindung zu einem der drei Unterwerke *Altstetten Neu*, *Sihlfeld* oder *Binz* gebaut werden soll, wurde ausgehend vom Unterwerk *Waldegg* zu allen anderen Unterwerken die kürzesten Pfade innerhalb einer bestimmten cutoff-Distanz ermittelt (siehe Abbildung 5 rechts)<sup>10</sup>. Für jede Verbindung ermittelte ein Algorithmus die Indikatorwerte für alle Ziele (siehe Kapitel 2.2). Bereits hier zeigt sich, dass die räumliche Varianz der Verbindungen zu den Unterwerken *Sihlfeld* und *Binz* kleiner ist als zum Unterwerk *Altstetten Neu*.

Strassennetzwerk mit Kreuzungen  
im Gebiet Waldegg – Altstetten – Sihlfeld – Binz



Über 800 Pfadalternativen in den Strassen und Trottoirs  
vom Unterwerk Waldegg zu drei weiteren Unterwerken

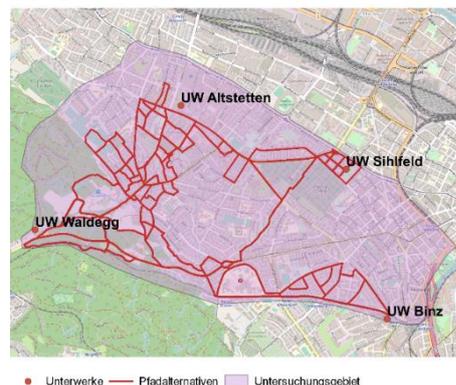


Abbildung 5: Vom Strassennetzwerk (links) zu den direktesten Verbindungen (rechts).

<sup>9</sup> <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19996141/index.html>

<sup>10</sup> Im der Abbildung 5 rechts sind etwas mehr als 800 Verbindungen ersichtlich, welche das Unterwerk Waldegg mit den anderen Unterwerken in relativ direkter Distanz verbinden.

### Funktionsprinzip

Die Nutzer definieren, welche Ziele ihnen wie wichtig erscheinen. Aufgrund dessen berechnet das 3D DSS eine Zielfunktion, die auf die ermittelten Einträge der im Netzwerkgraphen der Abbildung 5 rechts gespeicherten Daten angewendet wird. Anhand dessen werden die am besten geeigneten Pfade ermittelt. In der Abbildung 5 rechts wurden fünf Pfade mit ähnlich hohen Kosten ermittelt, wobei die räumliche Varianz gering ist. Der Algorithmus erlaubt es, in den Einstellungen des Entscheidungsmodells zu definieren, von welchem Unterwerk wie viele und welche anderen Unterwerke verbunden werden sollen. Des Weiteren kann angegeben werden, wie viele beste Alternativen ermittelt werden sollen.

**Fünf Verbindungen mit den geringsten Gesamtwiderständen**  
vom Unterwerk Waldegg zu drei weiteren Unterwerken

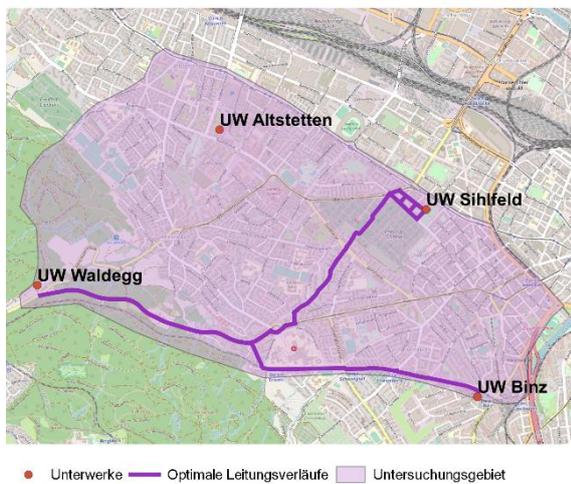


Abbildung 6: Die fünf Pfade mit den geringsten Gesamtkosten in Bezug auf ein Szenario.

## 5.5 Modellierung von kombinierten Leitungen

Das 3D DSS ist weltweit das erste und einzige Programm, das kombinierte Leitungen berechnen kann, die aus Freileitungs- und Erdkabelabschnitten besteht. Die Methode wird in der Dissertation von Schito (2020) genau beschrieben und wurde für das Sachplanverfahren optimiert. Die Schwierigkeit liegt darin, dass für Freileitungen und Erdkabel unterschiedliche Normen und Planungsrichtlinien gelten, sodass zwei unterschiedliche Entscheidungsmodelle gebildet werden müssen. Da sich der ideale Verlauf einer Freileitung meist von dem eines Erdkabels unterscheidet, stellt sich die Frage, an welchem Punkt ein Übergangsbauwerk gebildet werden soll, mit dem dann unter Berücksichtigung der Planungsregeln der aktuellen Übertragungstechnologie weitergefahren wird.

Für das Untersuchungsgebiet Innertkirchen–Mettlen wurde dabei angenommen, dass maximal in einem Abschnitt ein Erdkabel verbaut werden darf<sup>11</sup>. Das Verfahren, das im 3D DSS über das Frontend abrufbar ist, ist in der Abbildung 7 dargestellt und heisst *prozeduraler Ansatz*, da es der folgenden Prozedur folgt:

1. Identifizieren kritischer Zonen.
2. Algorithmus laufen lassen, der eine Freileitung modelliert und daraus die Schnittmenge mit den kritischen Zonen bilden.
3. Von allen Objekten der Schnittmenge durch Verwendung der räumlichen Indices *Average Nearest Neighbor* und *Getis-Ord Gi\** denjenigen Cluster auswählen, der am stärksten vom Bau einer Freileitung betroffen wäre<sup>12</sup>. Von diesem Cluster den Freileitungsabschnitt sowie den Start- und den Endpunkt des kritischen Clusters markieren.
4. Den Freileitungsabschnitt mit 500 Metern puffern und von dieser Fläche die kritischen Zonen subtrahieren. Diese Fläche entspricht dem möglichen Gebiet, in dem ein Erdkabel gebaut werden soll. Sollte das Gebiet nicht durchgängig sein, muss die Pufferdistanz erhöht werden.
5. In der Nähe des Start- und Endpunkts des kritischen Clusters nach zwei idealen Stellen suchen, wo ein Übergangsbauwerk platziert werden kann.
6. Vom einen zum nächsten Übergangsbauwerk unter Verwendung des Entscheidungsmodells für Erdkabel ein Erdkabel modellieren.
7. Jeden Abschnitt, den ersten Freileitungs-, den Erdkabel- und den zweiten Freileitungsabschnitt als solchen markieren.
8. Für jeden Abschnitt die Indikatorwerte hinsichtlich der definierten Ziele berechnen (siehe Kapitel 2.2).
9. Die Teilpfade zu einem zusammengesetzten Pfad zusammenhängen. In dieser Punkteliste die Übergangsbauwerke speziell markieren. Für den gesamten Pfad den Gesamtindikatorwert anhand der Teillängen berechnen.

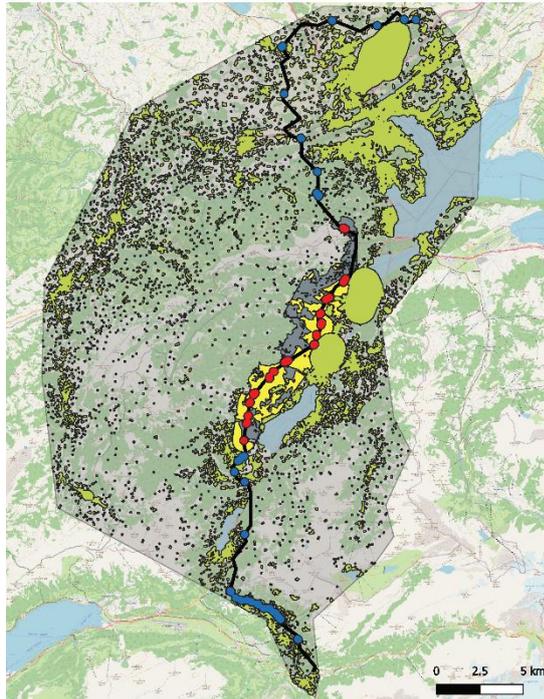
---

<sup>11</sup> Es wurde dabei angenommen, dass die Unterwerke in Innertkirchen und Mettlen über eine Freileitung angebunden werden, obwohl das 3D DSS bei Innertkirchen unter bestimmten Voraussetzungen dies als unmöglich erachtete. Aus diesem Grund musste das Unterwerk in Innertkirchen virtuell um einige hundert Meter verschoben werden. Deshalb muss diese Anbindung gesondert betrachtet werden.

<sup>12</sup> Der Algorithmus lässt sich auch auf mehrere Cluster ausweiten. Dies wurde erfolgreich getestet, jedoch in der aktuellen Version des 3D DSS auf ein Cluster beschränkt.

### critical areas for building an overhead line

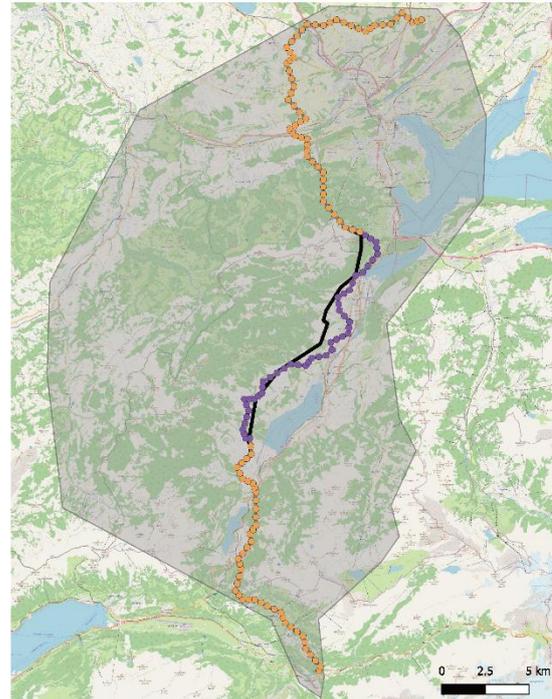
determined by the procedural approach



- determined overhead line
- step 1: critical areas
- step 2: intersecting locations
- step 3: critical cluster
- step 4: potential corridor
- step 5: potential areas for transition buildings
- study area Innertkirchen–Mettlen

### scenario optimized for a combined line

overhead and underground sections determined by the procedural approach



- resulting points
- overhead line (transmission tower)
- earth cable (sleeve)
- resulting line
- determined overhead line
- study area Innertkirchen–Mettlen

Abbildung 7: Resultate der Teilschritte des prozeduralen Ansatzes zur Bestimmung von kombinierten Leitungen.

## 5.6 Zusätzliche Modellierungsfunktionen

Die im Folgenden beschriebenen Funktionen sind im Modellierungsalgorithmus verfügbar. Sie sind jedoch nicht direkt über die Online-Benutzerschnittstelle abrufbar.

### 5.6.1 Evaluation eines vorgegebenen Leitungsverlaufs

Der Algorithmus berechnet einerseits den optimalen Leitungsverlauf anhand eines festgelegten Szenarios und wertet dieses anhand der definierten Zielvorgaben aus. Dafür wird eine Funktion verwendet, welche anhand einer Leitung (in diesem Falle diejenige, die berechnet wurde) überprüft, über welche Länge ein Schutzgebiet durchquert wurde (siehe Kapitel 2.2). Dieselbe, leicht erweiterte Funktion wurde in einer Studie (Schito, Jullier, und Raubal 2019) dazu verwendet, um einen vorgegebenen Leitungsverlauf zu analysieren.

In der erwähnten Studie wurden die Expertinnen und Experten dazu angehalten, ein Szenario festzulegen und auf einer Online-Karte zu skizzieren, wo sie sich den idealen Leitungsverlauf vorstellen (Abbildung 9 grüne Linie). Anhand des eingefügten Szenarios berechnete das 3D DSS den mathematisch optimalen Leitungsverlauf (Abbildung 9 schwarze Linie) und konfrontierte die Probanden mit den Resultaten, die auf einem Spinnennetzdiagramm abgebildet wurden (siehe Abbildung 8). Anhand dessen wurde die Bereitschaft ermittelt, mit der sich die Probanden dazu bereit erklärte, ihre Meinung zu revidieren. Da das Spinnennetzdiagramm als äusserst hilfreiches Analysetool bezeichnet wurde, wurde es im 3D DSS beibehalten.

Indicators  $f_j$  compared between participant D and the 3D DSS solution based on the scenario BAFU.b

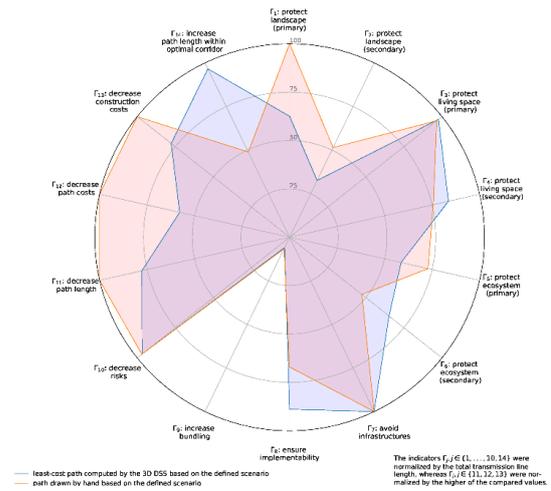


Abbildung 8: Spinnennetzdiagramm, das die Kennwerte der eingezeichneten und modellierten Linie hinsichtlich der definierten Ziele zeigt.

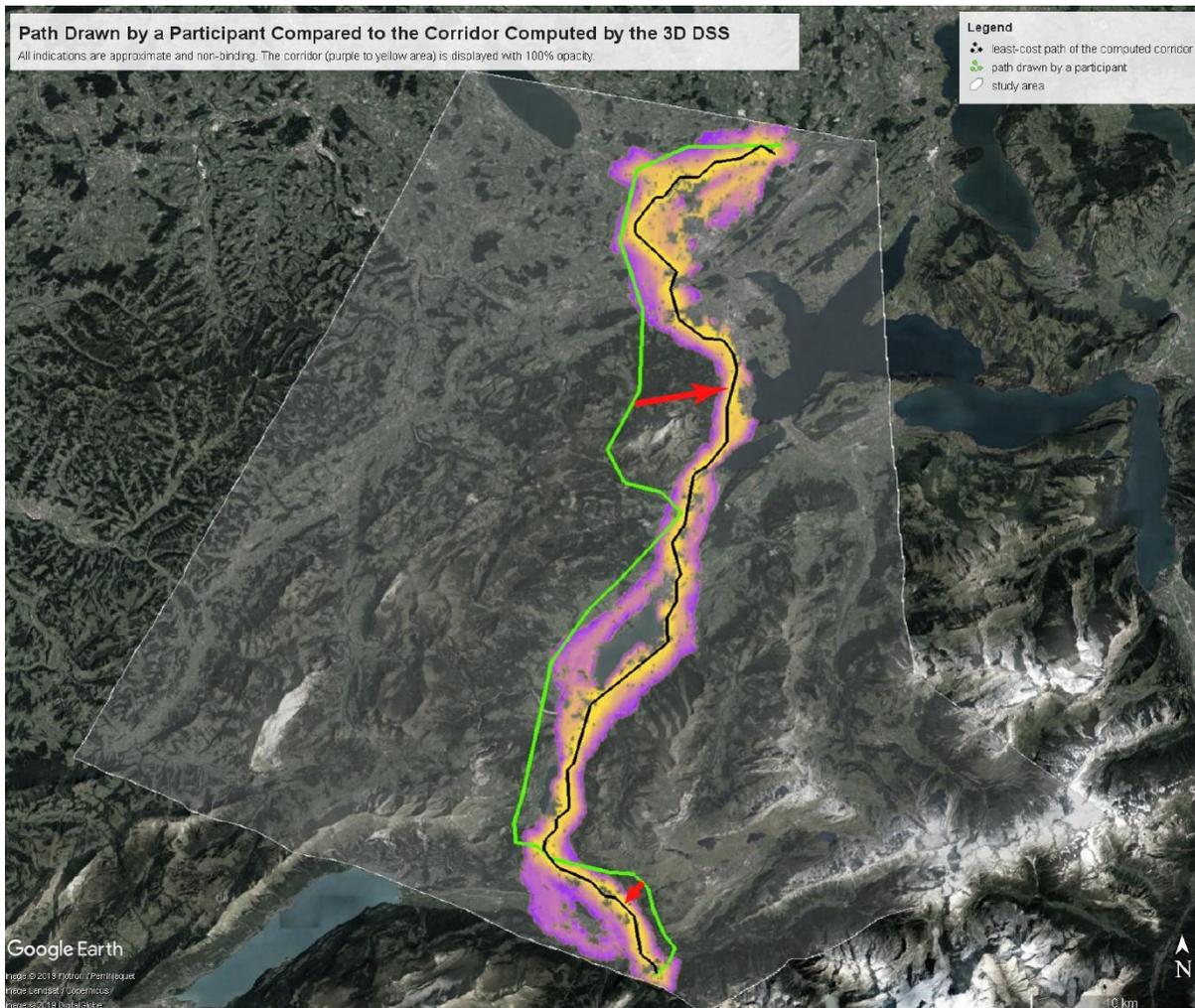


Abbildung 9: Eingezeichnete (grüne Linie) vs. vom 3D DSS ermittelte Linie und in welchen Bereichen sich die Person vorstellen konnte, ihre Meinung zu revidieren (rote Pfeile).

### 5.6.2 Ermittlung von Lösungsclustern mit hoher räumlicher Varianz

Eine weitere Funktion führt den Basisalgorithmus des 3D DSS für jede nur erdenkliche Einstellung in der Benutzerschnittstelle aus. Auf diese Weise kann eine Datenbank mit allen möglichen Pfad- und Korridoralternativen erstellt werden, mit der man über eine Sensitivitätsanalyse ermitteln kann, welche Faktoren mehr oder weniger zur räumlichen Varianz der Alternativen beitragen. Um die Performance zu steigern, wurde der Prozess parallelisiert.

In einer Studie (Schito, Wissen Hayek, und Raubal 2018) wurde dieses Verfahren genutzt, um anhand einer Lösungsmenge von knapp 40 Millionen alternativen Cluster diejenigen zu identifizieren, die sich in räumlicher Hinsicht stark voneinander unterscheiden. Dazu wurde ein mehrstufiges statistisches Verfahren angewendet und ermittelt, welche Parameter des Entscheidungsmodells mehr oder weniger zur räumlichen Varianz beitragen. Die Resultate dieser Studie dienten dazu, das Entscheidungsmodell des 3D DSS erstmals zu kalibrieren und diejenigen Methoden als Standardmethoden festzulegen, die den grössten Einfluss ausübten.

### 5.6.3 Finden von Pareto-optimalen Leitungsverläufen

Bestehen zwischen den Stakeholdern unterschiedliche Zielvorstellungen, kann durch MODA eine Alternative ermittelt werden, die diesen Zielvorstellungen am nächsten kommt. Einerseits können die eingegebenen Zielwerte durch verschiedene Methoden aggregiert werden, was in einer Masterarbeit untersucht wurde (Schoinas 2018). Andererseits kann versucht werden, aus diesen Zielvorstellungen eine Pareto-Front abzuleiten, um den Ergebnisraum und somit die Möglichkeiten, über die man verhandeln kann, zu verringern. In einer Studie (Schito, Moncecchi, und Raubal 2020) wurde diese Methode auf eine grosse Anzahl von möglichen Routen angewendet, um daraus zuerst diejenigen zu extrahieren, die gegenüber den Restlichen dominant sind. Auf diese dominanten Favoriten wurde anschliessend eine Zielfunktion angewendet, um die Pareto-optimalen Alternativen zu identifizieren. Die Methode stellte sich als geeignet dar, um den Ergebnisraum so einzuschränken, dass die identifizierten Leitungsverläufe mathematisch untermauert werden können.

### 5.6.4 Ermittlung kombinierter Leitungen anhand eines probabilistischen Ansatzes

In der Dissertation von Schito (2020) wird mit dem probabilistischen Ansatz eine zweite Methode beschrieben, um kombinierte Leitungen zu berechnen. Dabei werden die Entscheidungsmodelle der beiden Übertragungstechnologien verwendet, aber so gewichtet, dass ihre Summe jeweils 100% ergibt. Aus den Realisierungen für jede Gewichtungskombination ergibt sich ein least cost path, der beide Entscheidungsmodelle verinnerlicht – jedes einmal mehr, einmal weniger. Da der probabilistische Ansatz in der Studie nicht in allen Punkten so gut abgeschnitten hat wie der prozedurale Ansatz, wurde die Funktion in der Online-Benutzerschnittstelle ausgeblendet.

### 5.6.5 Ermittlung exakter Mastpositionen

Piveteau (2017) entwickelte auf Basis von Rheinerts (1999) Algorithmus eine Methode, um Masten ideal zu platzieren, indem der Durchhang der Leitungen berechnet wird. Die entwickelte Methode bestimmt zuerst alle Alternativen, welche die Anforderungen der NISV erfüllen und findet daraus anschliessend diejenige Alternative, welche die definierten Ziele am besten erfüllt. Ein Teil des Ansatzes findet im unter Punkt 5.6.3 beschriebenen Algorithmus Verwendung.

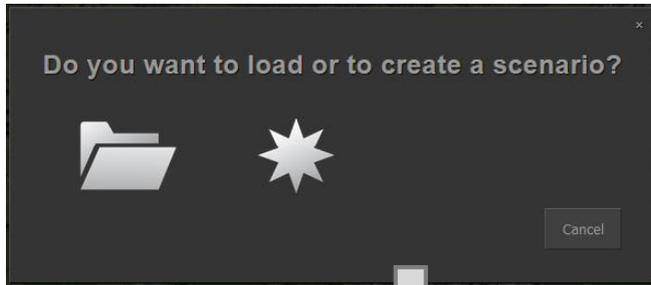
### 5.6.6 Ermittlung von Gewichtungen durch unterschiedliche Fragetechnik

Nebst der direct rating-Methode wurden vergleichende Erhebungsmethoden angewendet (Schoinas 2018; Schito 2020). Namentlich erwies sich das swing-Verfahren als geeignete und akzeptierte Möglichkeit, die Gewichtungen zu erheben. Da alle Faktoren miteinander in Bezug gebracht werden müssen, macht dieses Verfahren in der Praxis jedoch nur bei wenigen Faktoren Sinn, da die Anzahl Vergleiche  $\sum_{i=1}^n (n - 1)$  entspricht und somit mit aufsteigender Anzahl zunimmt.

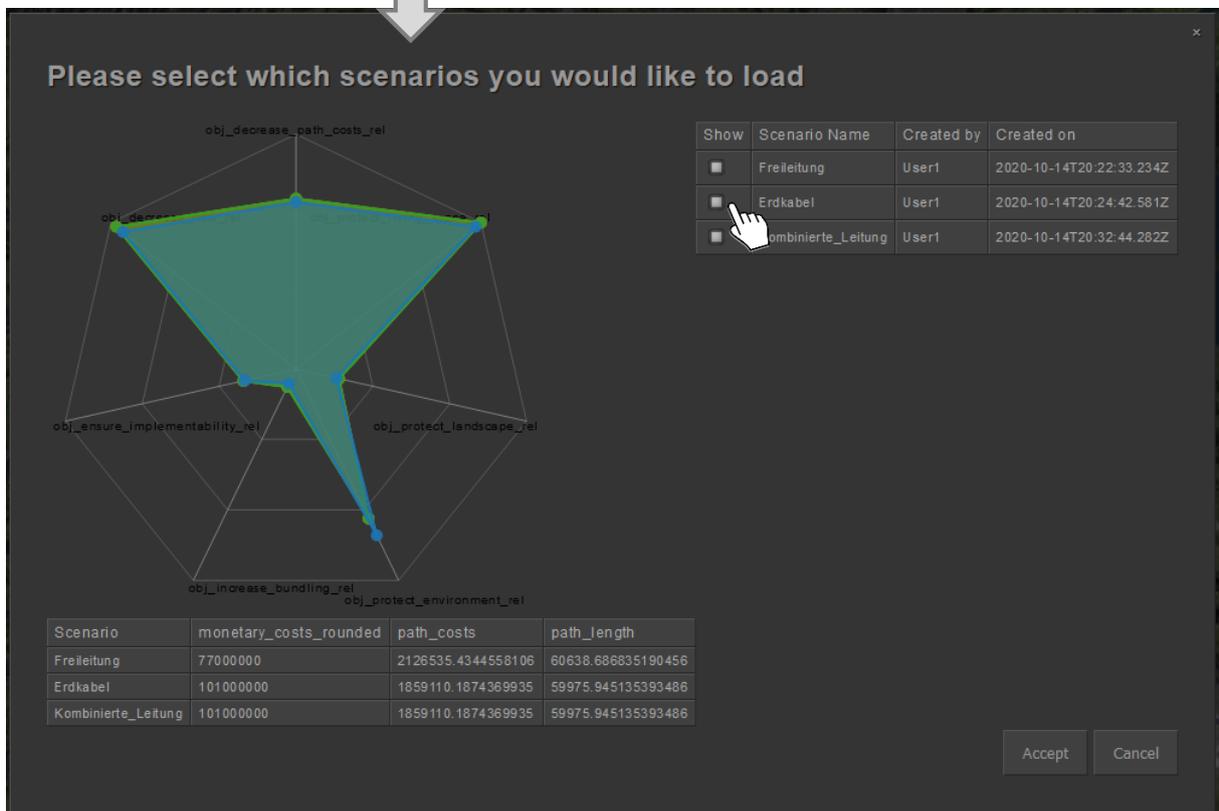
## 5.7 2D-Visualisierung des Raumwiderstands, Planungsgebiets und Korridors

### 5.7.1 Berechnete Szenarien laden

Alle berechneten Szenarien werden auf dem Server des 3D DSS gespeichert. Sie lassen sich aus einer Liste auswählen und laden. Hierzu durch Mausklick auf das Feld mit dem «PLUS-Zeichen»  den Szenario-Wizard starten und auf das «Ordner»-Symbol klicken.



Es öffnet sich ein Fenster mit der Liste der bereits berechneten Szenarien. Hier kann durch Klick auf die Boxen «Show» ausgewählt werden, welche Szenarien im Viewer des 3D DSS angezeigt werden sollen. Zudem wird links im Spinnendiagramm angezeigt, wie gut die Szenarien die jeweiligen Ziele erfüllen.



Show	Scenario Name	Created by	Created on
<input type="checkbox"/>	Freileitung	User1	2020-10-14T20:22:33.234Z
<input checked="" type="checkbox"/>	Erdkabel	User1	2020-10-14T20:24:42.581Z
<input type="checkbox"/>	Kombinierte_Leitung	User1	2020-10-14T20:32:44.282Z

Scenario	monetary_costs_rounded	path_costs	path_length
Freileitung	77000000	2126535.4344558106	60638.686835190456
Erdkabel	101000000	1859110.1874369935	59975.945135393486
Kombinierte_Leitung	101000000	1859110.1874369935	59975.945135393486

In der Tabelle unterhalb des Spinnendiagramms werden für die berechneten Korridore der Szenarien die indikativen Baukosten (siehe Kapitel 5.3.4) für ein Trasse innerhalb des Korridors als Gesamtkosten (in CHF) sowie die Länge des Trassees angegeben. Die indikativen Baukosten werden als «monetary\_path\_costs» bezeichnet, während die «path\_costs» die über die Pfadlänge aufsummierten Raumkosten angeben.

### 5.7.2 Raumwiderstand, Planungsgebiet und Korridor anzeigen

Für jedes berechnete Szenario erscheint in der Navigationsleiste des 3D DSS ein neues Feld mit dem Namen des Szenarios sowie Schaltflächen, mit denen die Ergebniskarten angezeigt werden können.



**Raumwiderstand:** Resultat der Aufsummierung der eingestellten Widerstände und Gewichtung unter Berücksichtigung aller Faktoren.



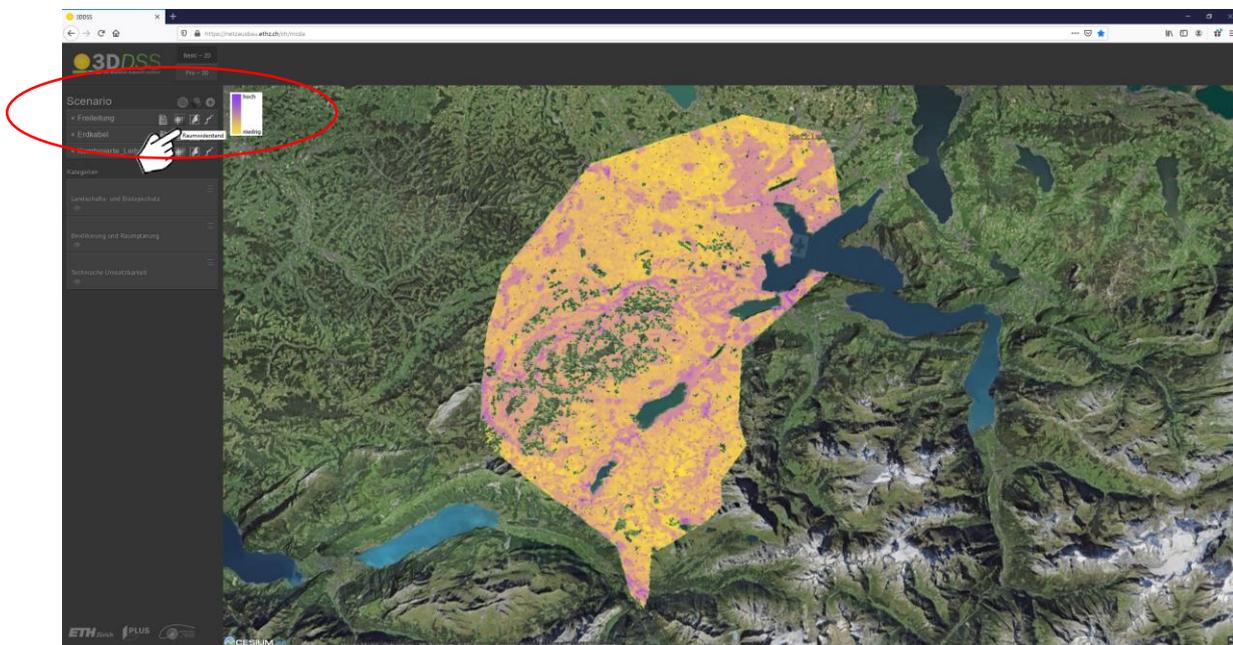
**Planungsgebiet:** Die Karte zeigt räumlich die relativen Raumkosten für den Bau von Leitungen auf, die sich aus dem Einbezug des Raumwiderstands aus allen Faktoren ergeben.



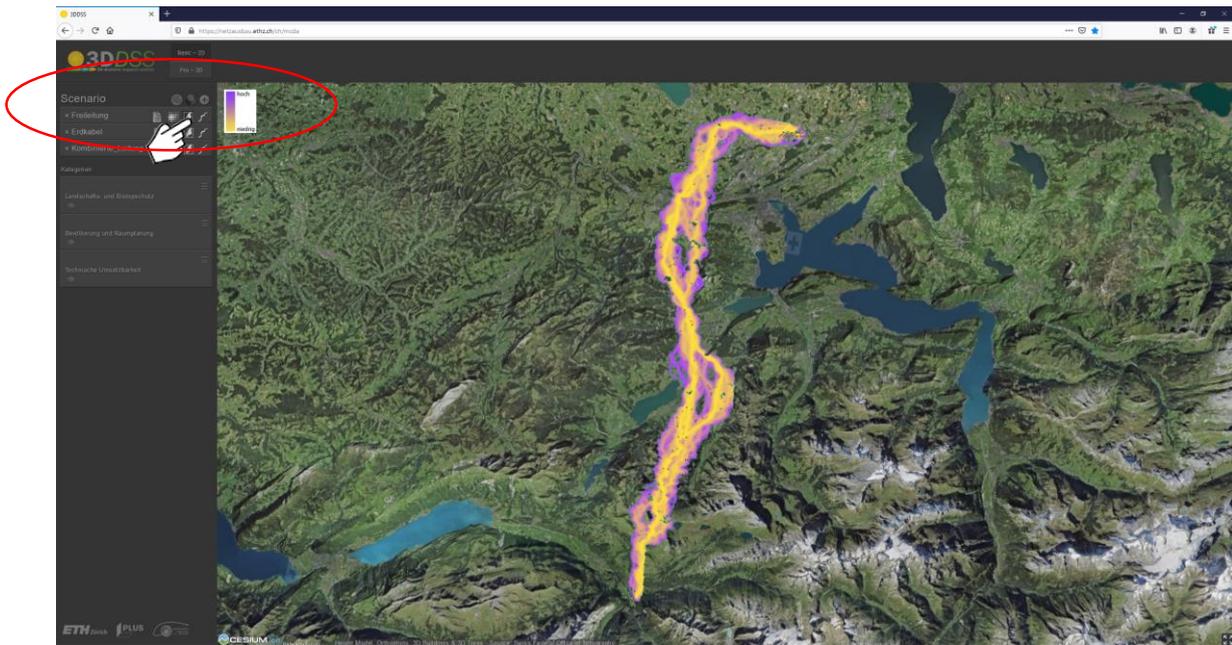
**Korridor:** Bereich, in dem der Bau einer Leitung gemäss dem gewählten Szenario die geringsten relativen Raumkosten verursacht. (blau = Freileitungen; gelb = Erdkabel)

Die Legende für die Raumwiderstandskarte sowie die Karte des Planungsgebiets lässt sich mit der Keyboard-Taste «R» ein- und ausblenden.

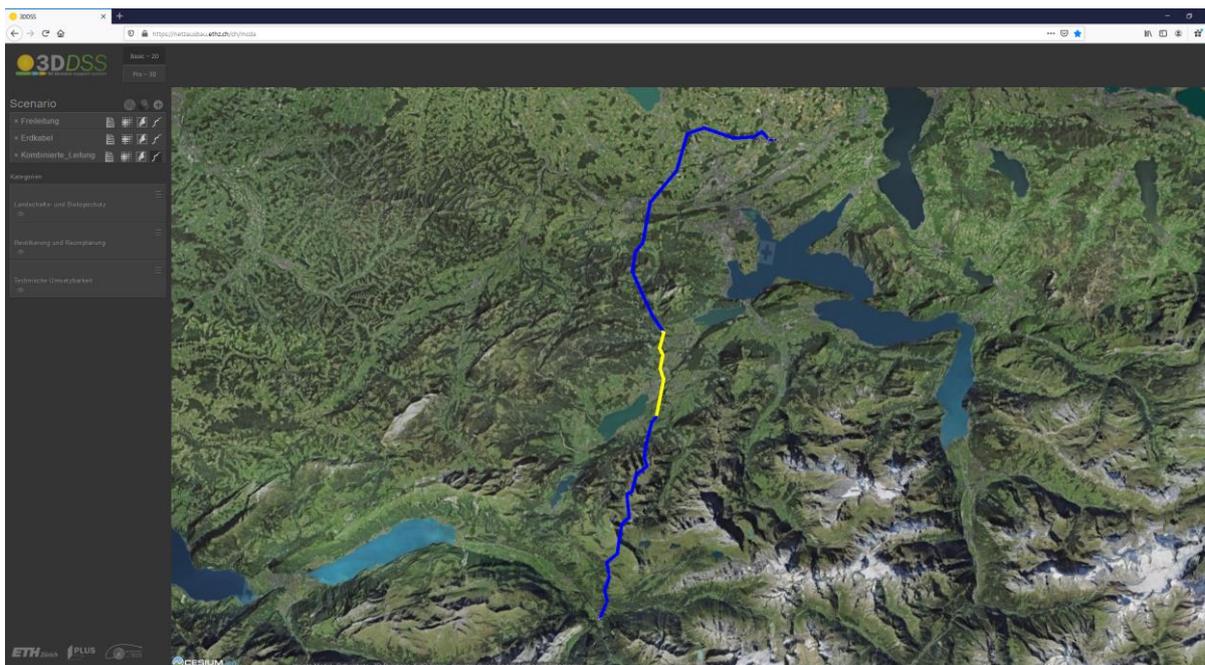
Raumwiderstandskarte:



Planungsgebiet:



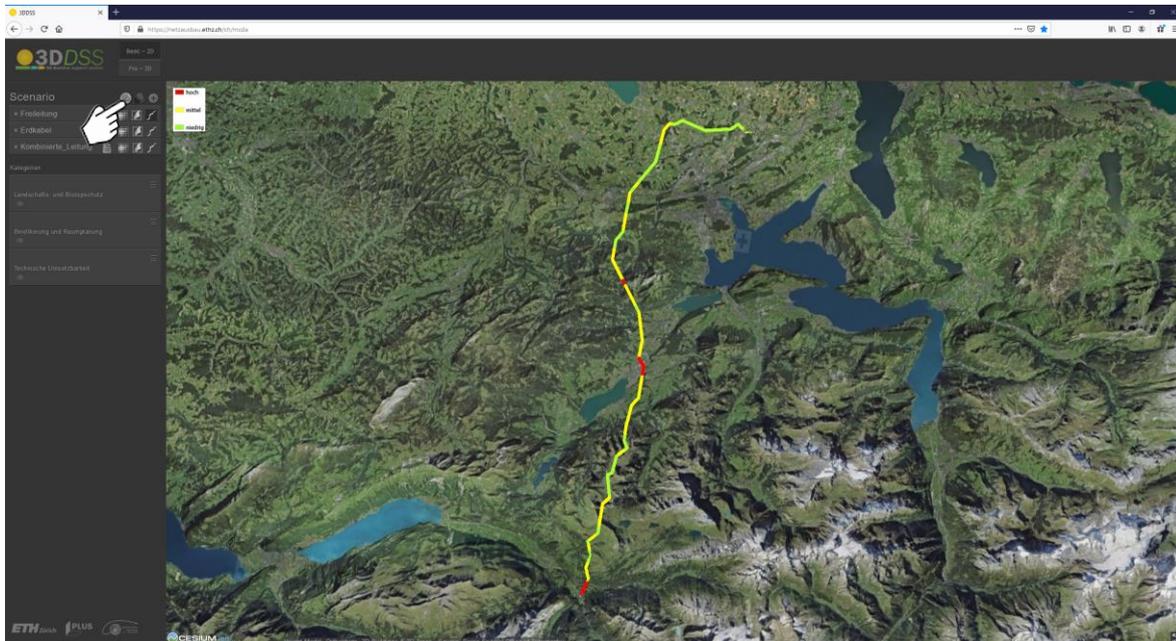
Korridor – Kombinierte Leitung:



(blau = Freileitungen; gelb = Erdkabel)

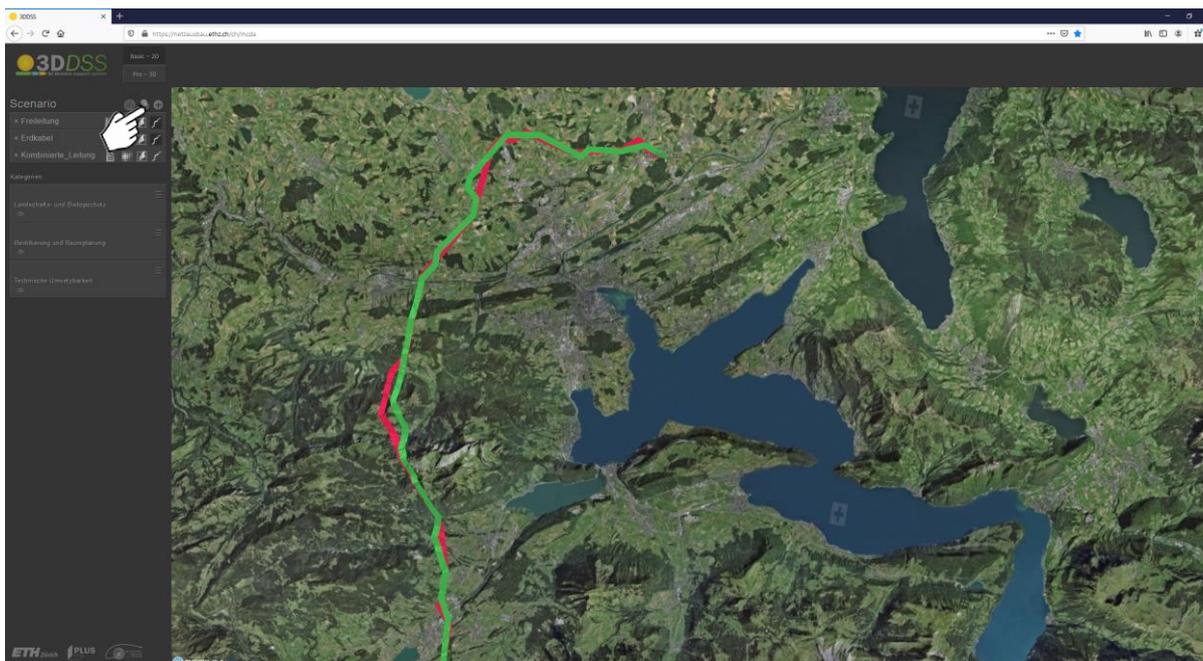
### 5.7.3 Korridor – Indikative Baukosten

Mit einem Mausklick auf die kreisförmige Schaltfläche mit dem Münzen-Symbol  wird der Korridor gemäss den berechneten indikativen Baukosten pro Kilometer in drei Stufen (niedrig, mittel, hoch) klassiert angezeigt. Mit der Keyboard-Taste «K» lässt sich die Legende ein- und ausblenden. Um wieder zur ursprünglichen Einfärbung nach Leitungstyp (blau = Freileitungen; gelb = Erdkabel) zu gelangen, wird nochmals auf das Münzen-Symbol geklickt.



### 5.7.4 Korridore verschiedener Szenarien vergleichen

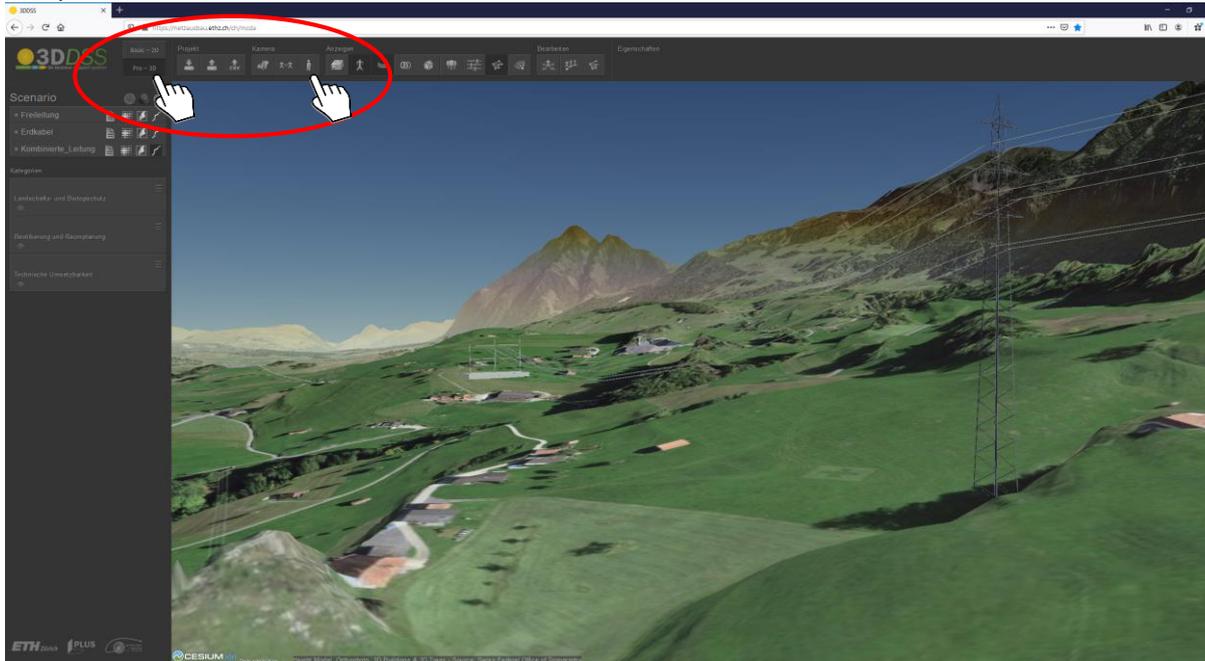
Sollen mehrere Szenarien miteinander verglichen werden, können die verschiedenen Korridore unterschiedliche eingefärbt werden. Hierzu wird auf die Schaltfläche mit den drei Kreisen geklickt .





Perspektive

wechseln:

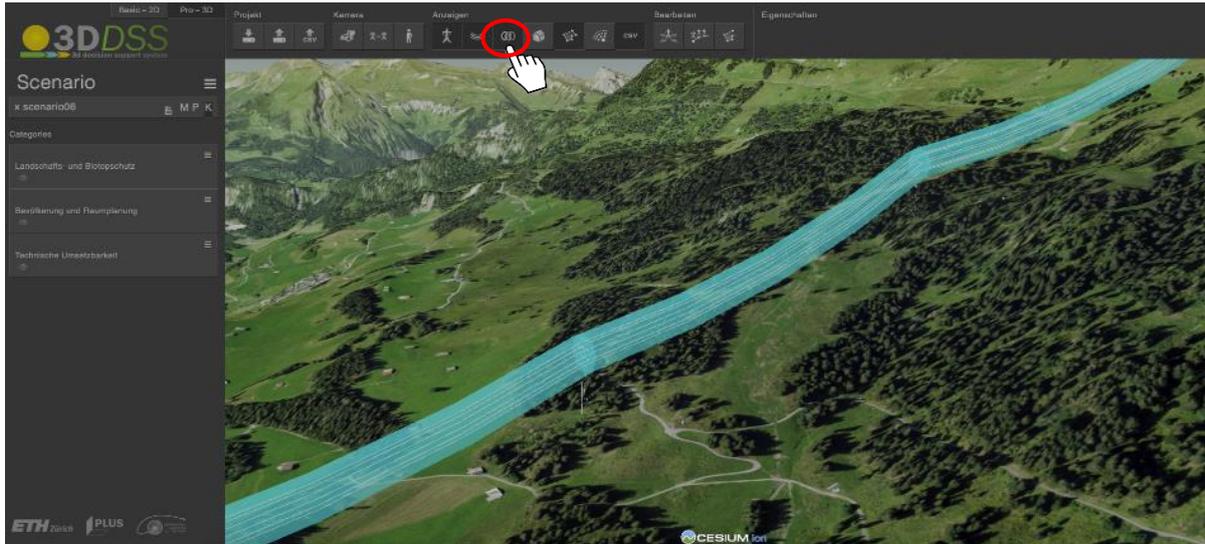


### 5.8.2 Anzeigen: Strommasten, Leitungen, Gebäude, etc.

Im Bereich «Anzeigen» stehen Schaltflächen zur Verfügung, mit denen sich die Masten bzw. Umspannwerke und Leitungen ein- und ausblenden oder die Leitungen farblich hervorheben lassen (mehrmaliges Klicken auf die Schaltfläche «Leitungen»).



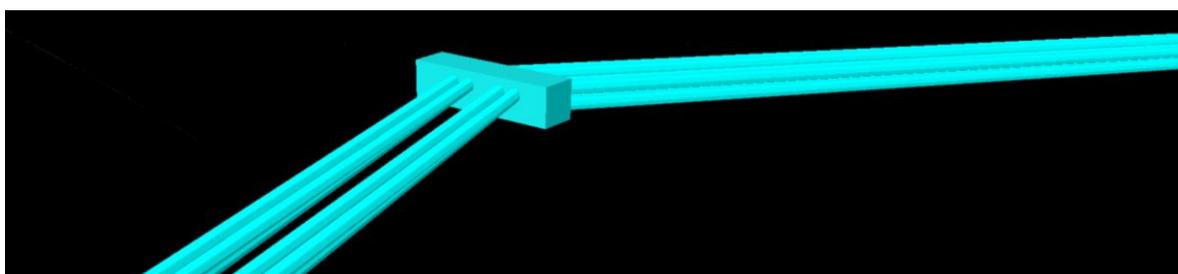
Zudem können nötige Abstände oder Bereiche wie das elektromagnetische Feld in Form von blauen Feldern um die Leitungen visualisiert werden.



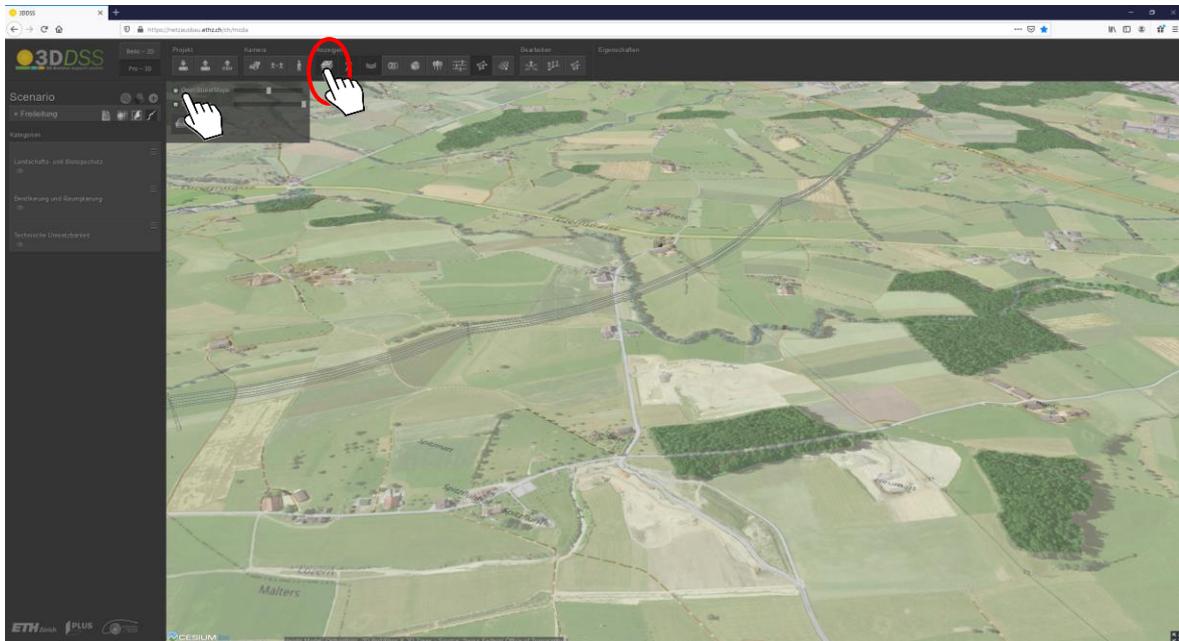
Um die unterirdisch verlaufenden Erdkabel zu sehen, kann das Geländemodell transparent geschaltet werden. Hierzu auf die Schaltfläche «Darstellung» klicken und dann im sich öffnenden Fenster die linke untere Schaltfläche «toggle translucent terrain» aktivieren. Wird nun weiter in die Ansicht reingezoomt, wird das Gelände transparent und die Erdkabel werden sichtbar.



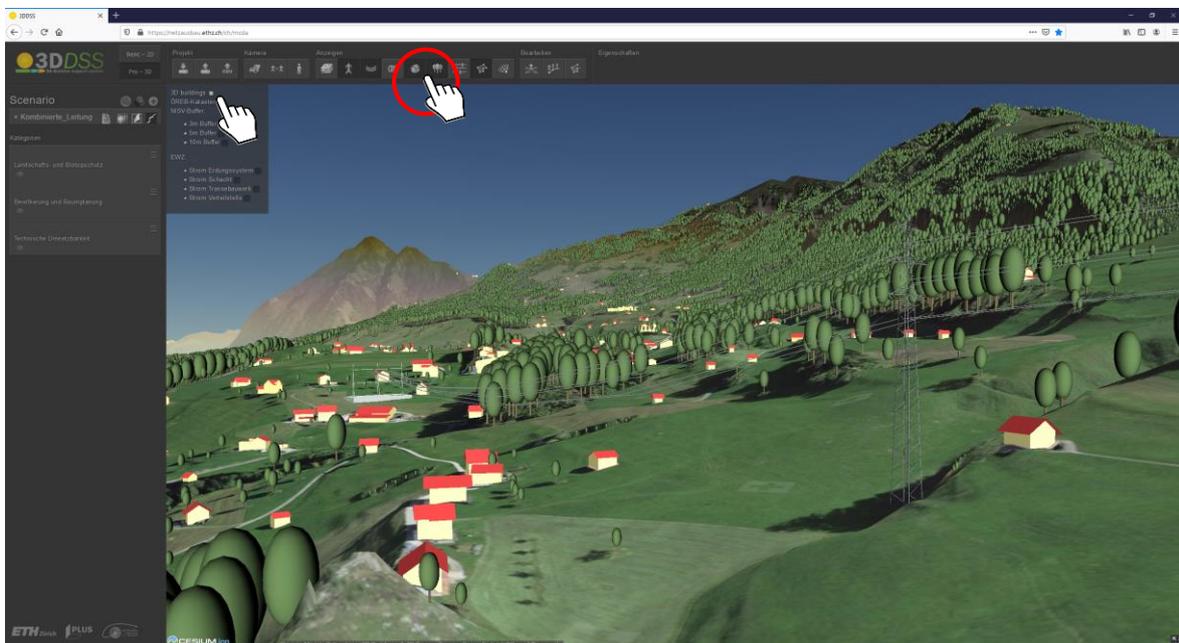
Muffenschächte sind als Boxen (2.5 m x 10 m x 2.1 m) visualisiert, die bei Richtungsänderung der Kabel sowie in einem regelmässigen Abstand von 1000 m platziert sind.



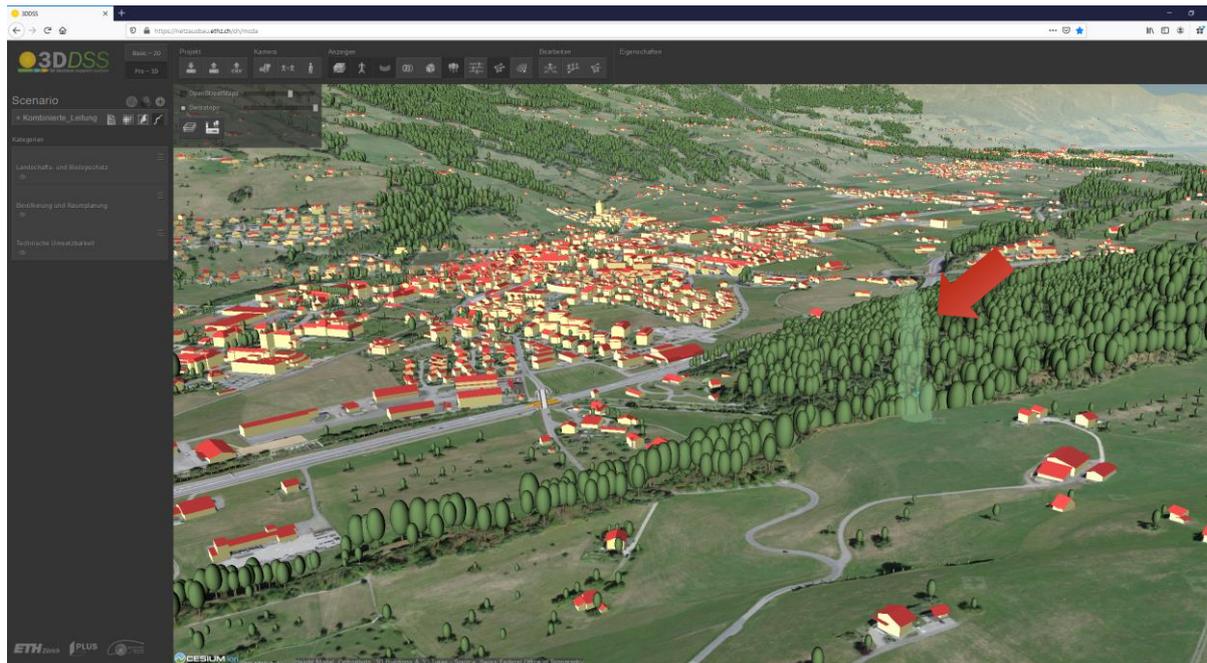
Für eine bessere Orientierung kann mit Mausclick auf die Schaltfläche «Darstellung» im sich öffnenden Fenster die «OpenStreetMap» aktiviert und die Transparenz mit dem Schieberegler eingestellt werden. So werden Strassennamen, Ortsbezeichnungen und Landnutzungsklassen (Wald, Siedlung, Landwirtschaft etc.) sichtbar.



3D-Objekte von Gebäuden und Bäumen können mit den Schaltflächen «3D-Gebäude» und «3D-Vegetation» eingebledet werden.



In bewaldeten Bereichen, durch die ein modelliertes Erdkabel verläuft, sind die 3D-Bäume heller eingefärbt. Dies kennzeichnet die sogenannte Freihaltezone, in denen die Bäume entfernt werden und nur noch niedrige Vegetation erlaubt ist. Die Freihaltezonen haben eine Breite von 25 m.



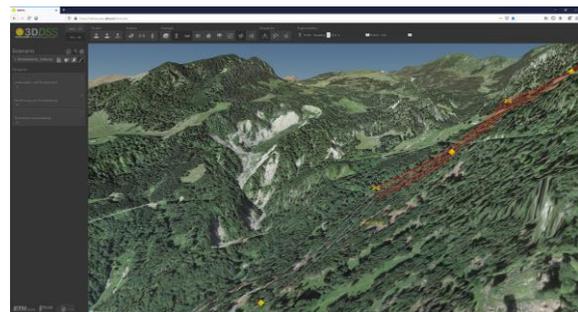
### 5.8.3 Bearbeiten: Masten verschieben

Im Bereich «Bearbeiten» steht eine Schaltfläche zum Verschieben von Masten zur Verfügung. Wird dieser betätigt, so erscheinen Pfeile über den Masten. Mit einem Klick auf einen dieser Pfeile erscheint ein Kreis über den 3D-Objekten der Masten oder Übergangsbauwerke und sie lassen sich mit gedrückter linker Maustaste in die gewünschte Richtung verschieben. Sobald das 3D-Objekt 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.



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



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

### 5.8.4 Projekt: Sichern und Laden

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

## 5.9 3D-Visualisierung von bestehenden Leitungen (Zürich)

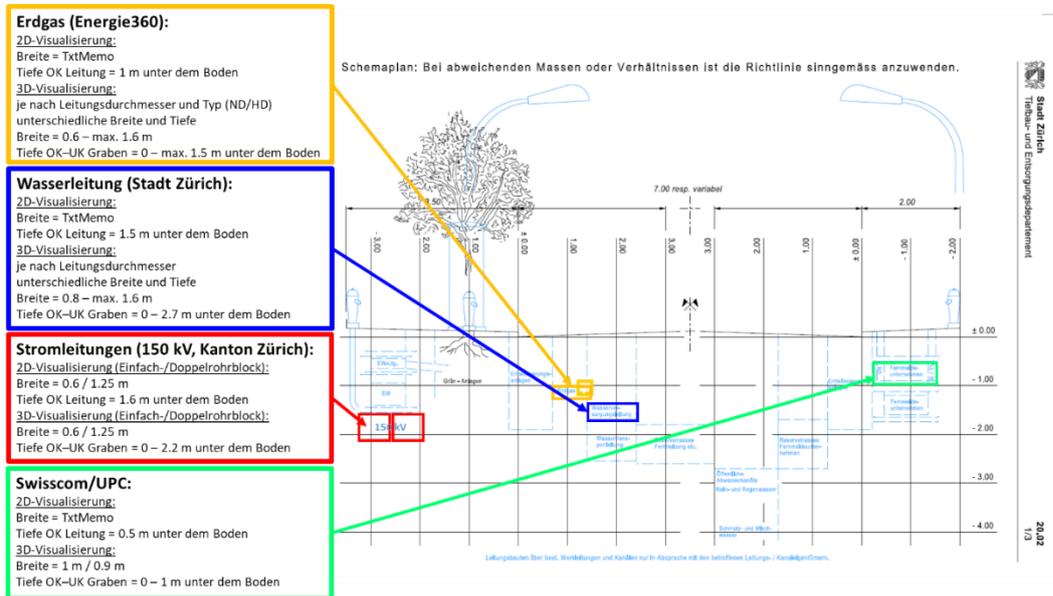
Für die Fallstudie «Zürich» lassen sich bestehende Leitungen im Untergrund gemäss Leitungskataster der Stadt Zürich<sup>13</sup> im 3D DSS anzeigen. Sie umfassen digitale Informationen zu Gas-, Wasser-, Fernwärme-, Telekommunikation- und Strom-Leitungen. Darüber hinaus können Datensätze zu Strominfrastrukturanlagen der ewz eingeblendet werden, die eine höhere Lagegenauigkeit aufweisen als die städtischen Stromleitungsdaten. Eine Übersicht der im 3D DSS verfügbaren Leitungsdatensätze gibt Tabelle 5.

Tabelle 5: Übersicht der im 3D DSS verfügbaren Datensätze bestehender Leitungen im Untergrund.

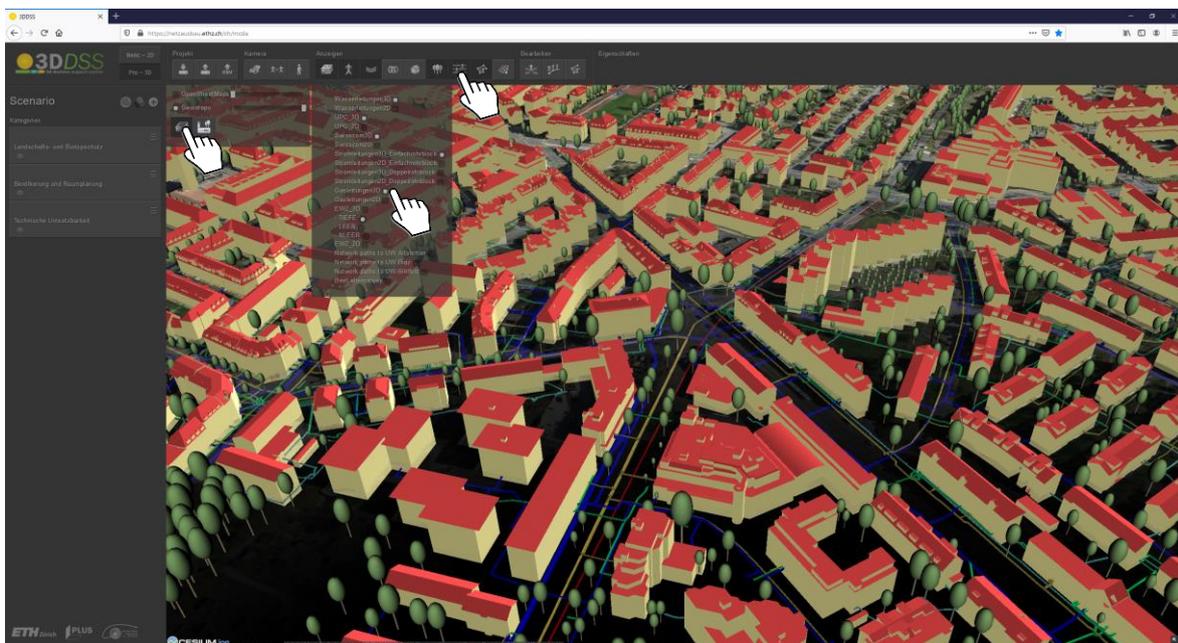
Dateneigentümer	Datensatz	Format	Inhalt
<b>AWEL, Kanton Zürich</b>	EN_STROMANLAGEN_P.shp	ESRI Shapefile	Strominfrastrukturanlagen (inexact position)
<b>ewz</b>	Strom_alle_Trassentypen_Flächen.shp ...Beschriftungstexte.shp ...AchsenRohre.shp Strom_Erdungssystem.shp Strom_Schacht.shp Strom_Station.shp Strom_Trassebauwerk.shp Strom_Ueberdeckung.shp Strom_Verteilstelle.shp	ESRI Shapefile	Strominfrastrukturanlagen (exact position)
<b>Energie 360° AG</b>	gas-2019-0104-1	DXF	Werkleitungsdaten Gas
<b>Erdgas Ostschweiz AG</b>	AV_261-zuerich-gds.itf DM01AVZH24LV95.ili	INTERLIS 1 (.itf)	Rohrleitungen (Hochdruck); Leitung im Datensatz «gas-2019-0104-1» enthalten
<b>Wasserversorgung Zürich</b>	Wasserleitungen_Hauptleitungen	DXF	Wasserleitungen
<b>AWEL, Kanton Zürich</b>	EN_KVA_WAERMENETZ_L	ESRI Shapefile	Fernwärmeleitungen Keine Leitung im Studiengebiet enthalten
<b>Swisscom AG</b>	Stadt-Zürich_LK-Swisscom_20190604	DXF / DWG	Kommunikationsleitungen
<b>UPC</b>	8048_Zürich_Projekt 3D_DDS	DXF	Internet-/TV-Leitungen

<sup>13</sup> <https://www.stadt-zuerich.ch/lk>

Für die 3D-Visualisierung der Leitungen wurden die Dimensionen von Leitungen aus Attributen in den Datensätzen bzw. die Dimensionen von Grabenschächten aus der Literatur abgeleitet:

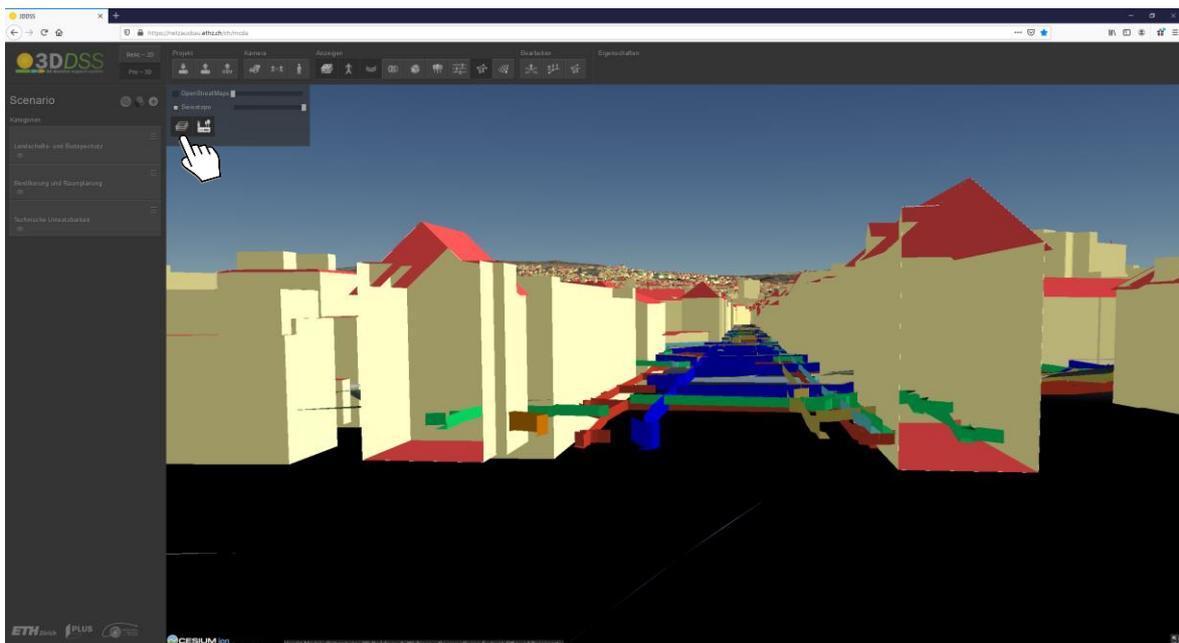


Mit Mausclick auf die Schaltfläche «Leitungen» öffnet sich ein Fenster, in dem ausgewählt werden kann, welche Leitungen angezeigt werden sollen. Die Endung «3D» weist darauf hin, dass die Leitungen mit der Dimensionierung von Grabenschächten aufbereitet wurden, endet die Bezeichnung auf «2D», wurde die Dimensionierung für die Leitung gewählt. Grabenschächte beginnen an der Oberfläche, um den gesamten belegten Raum im Boden anzuzeigen. Für Leitungen aus dem Zürcher Leitungskataster wurde eine Überdeckung gemäss Angaben aus der Literatur angenommen. Für die ewz-Daten wurde der in der Attributtabelle angegebene Wert für die Überdeckung verwendet. Um die Leitungen im Boden zu sehen, muss das Geländemodell transparent geschaltet und in die Ansicht gezoomt werden (Schaltfläche «Darstellung» → «toggle translucent terrain»).

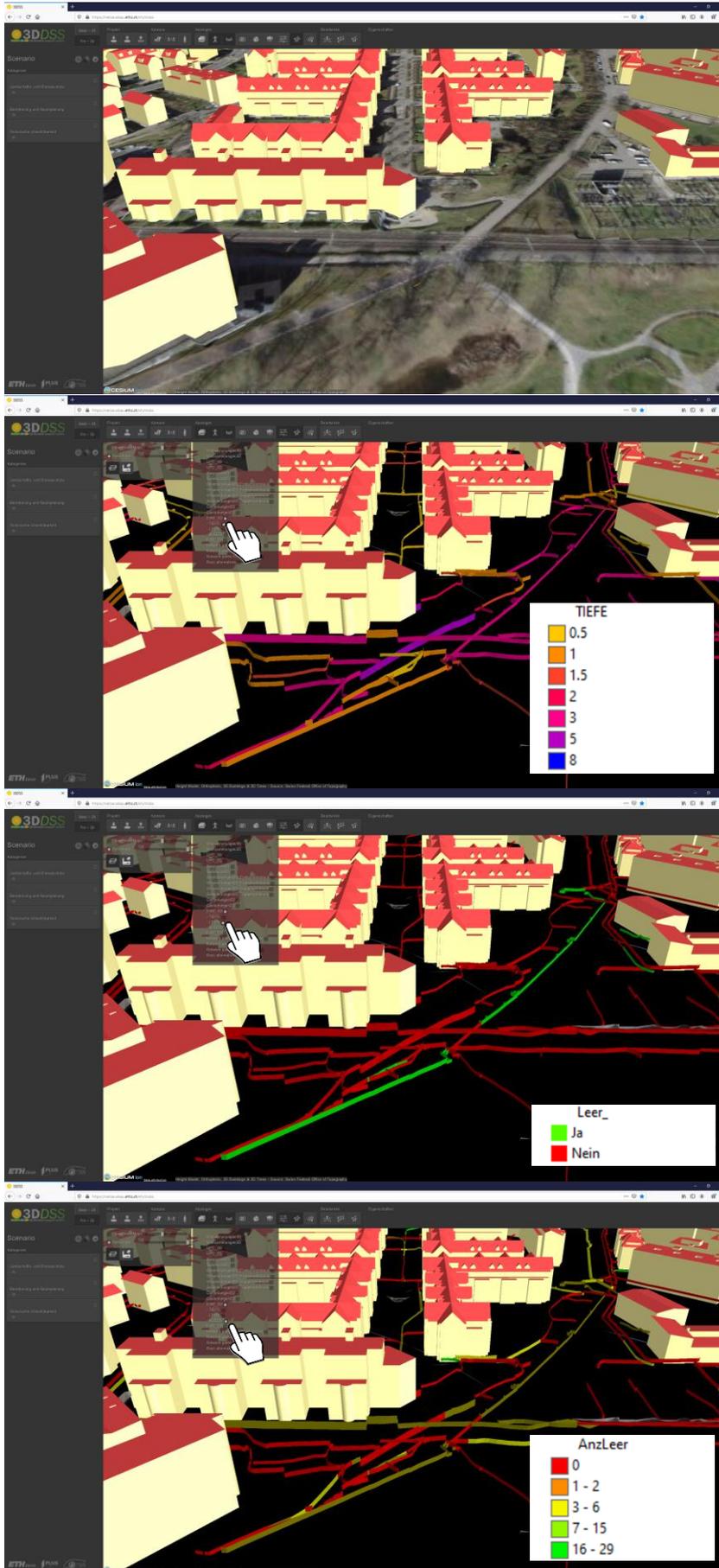


Zusätzlich können Schnittansichten erzeugt werden, um die Verteilung der Leitungen im Boden zu veranschaulichen. Hierzu wird zuerst auf die Schaltfläche «Darstellung» und anschliessend die Schaltfläche «Clipping plane» geklickt. Die Schaltfläche «toggle translucent terrain» sollte deaktiviert sein. Mit

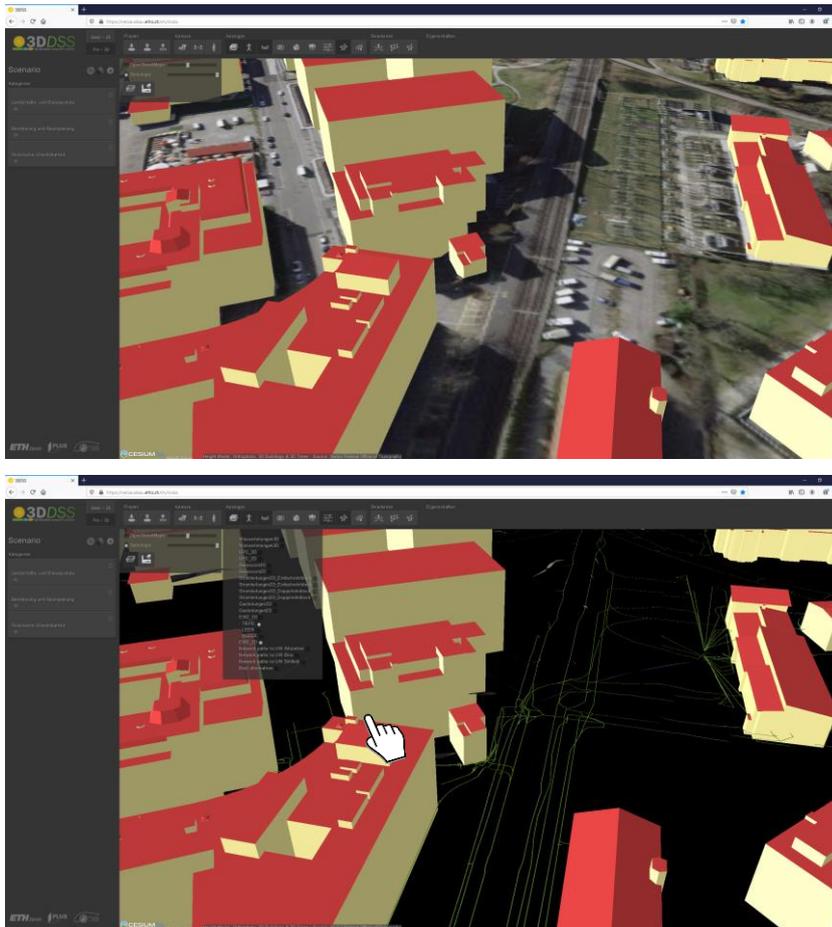
einem Mausklick im Viewer auf das Gelände wird der Startpunkt des Schnittes festgelegt, mit einem zweiten Mausklick auf der linken Seite dieses Punktes, wird die Richtung der Schnittfläche definiert. Als Resultat werden alle 3D-Objekte vor dieser Schnittfläche ausgeblendet. Nun kann das Gelände wieder transparent gestellt werden, um die Leitungen in der Schnittdarstellung zu sehen.



Der ewz-Datensatz «Strom\_alle\_Trassentypen\_Flächen.shp» enthält detaillierte Informationen über die Belegung der Rohrblöcke. Attribute spezifizieren, ob ein Rohrblock leer ist oder nicht und wie viele Rohre noch verfügbar sind. Zudem steht die Information über die Tiefe der Überdeckung zur Verfügung. Im 3D DSS lässt sich der aufbereitete Datensatz «EWZ-3D» nach diesen Attributen unterschiedlich einfärben.



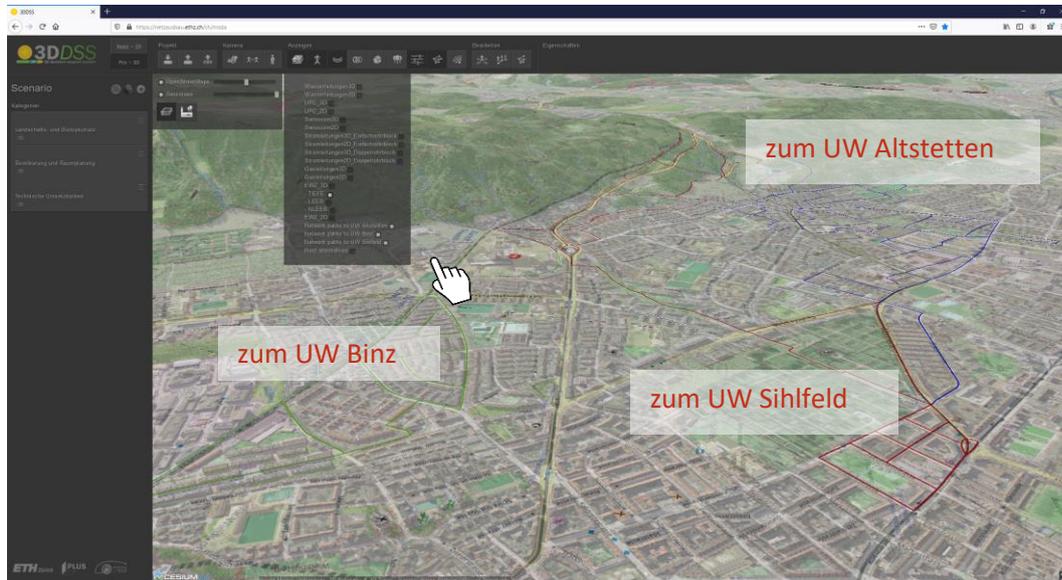
Die aus dem Datensatz «Strom\_alle\_Trassentypen\_AchsenRohre.shp» abgeleiteten Daten «EWZ-2D» zeigen die Lage der Leitungen auf.



Weitere Punkt- und Polygondaten der ewz-Daten zu Erdungssystem, Schächten, Trassebauwerken und Verteilstellen lassen sich mit Mausklick auf die Schaltfläche «3D-Gebäude» und Aktivierung der Boxen der jeweiligen Datenlayer anzeigen.

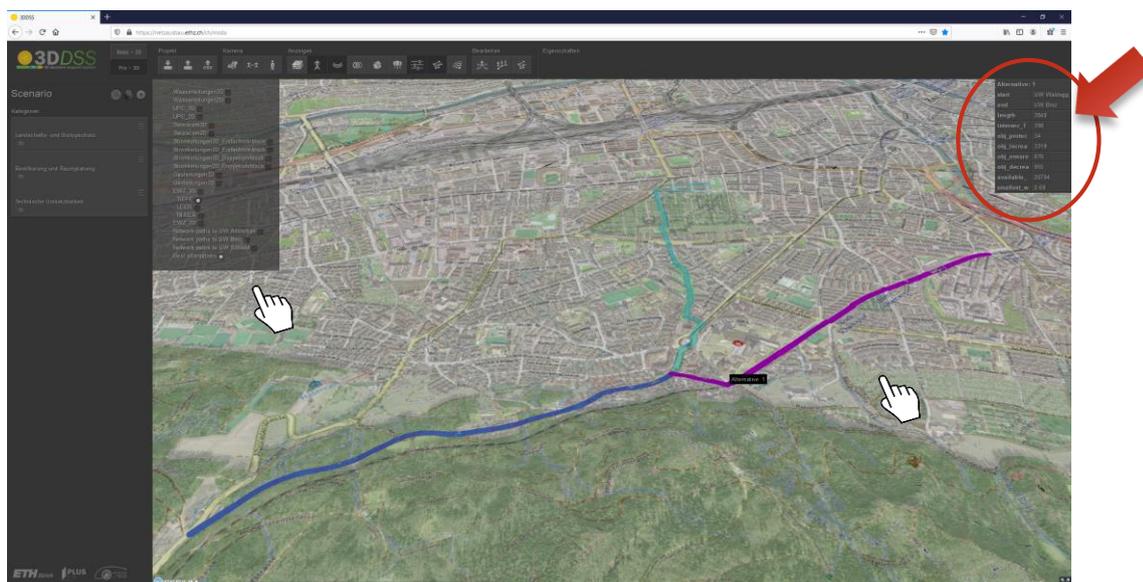
### 5.10 Visualisierung von alternativen Netzwerkpfeaden (Zürich)

Die Modellierung für die Fallstudie «Zürich» ergibt eine grosse Anzahl verschiedener Netzwerkpfade zwischen dem Unterwerk (UW) Waldegg und den Unterwerken Altstetten, Binz und Sihlfeld. Für die Visualisierung wurden alle Netzwerkpfade zwischen Start-UW Waldegg und dem jeweiligen Ziel-UW aggregiert. Die möglichen Pfade für ein Ziel-UW (UW Altstetten = blau; UW Binz = grün; UW Sihlfeld = rot) lassen sich so anzeigen.



Darüber hinaus lassen sich die fünf besten Netzwerkpfad-Alternativen einblenden. Wird mit der Maus über die Pfade gefahren, wird die jeweilige Alternative in violett hervorgehoben und die Bezeichnung der Alternative in einer schwarzen Box angezeigt. Da sich die Pfade der verschiedenen Alternativen überlagern, erscheint der Pfad in einigen Teilen Dunkelblau.

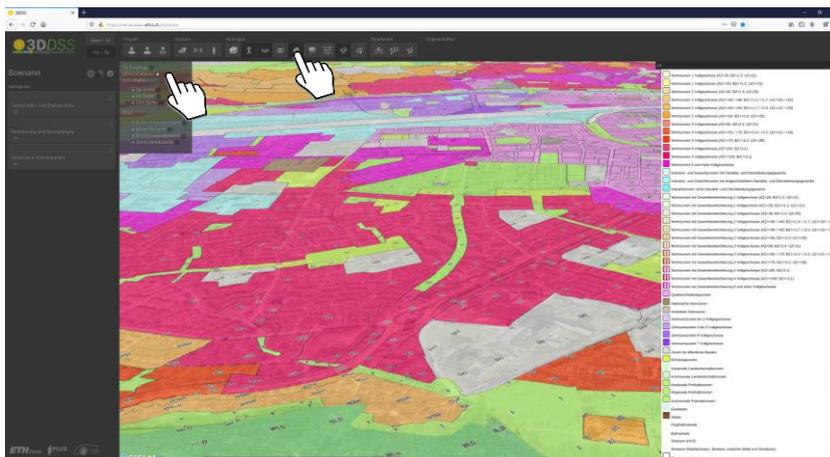
Durch Mausklick auf den Pfad, werden die Attribute des Datensatzes für die gewählte Alternative in einer Box am rechten oberen Rand des 3D DSS angezeigt. Hier sind verschiedene Informationen zur Einschätzung der Qualität der Alternative wie die Länge, die Anzahl gekreuzter Leitungen, der Grad der Zielerreichung (z.B. Schutz des menschl. Lebensraums; Bündelung von Leitungen) oder die Verfügbarkeit von Platz im Untergrund angegeben.



## 5.11 Visualisierung von weiteren Informationen für die Analyse (Zürich)

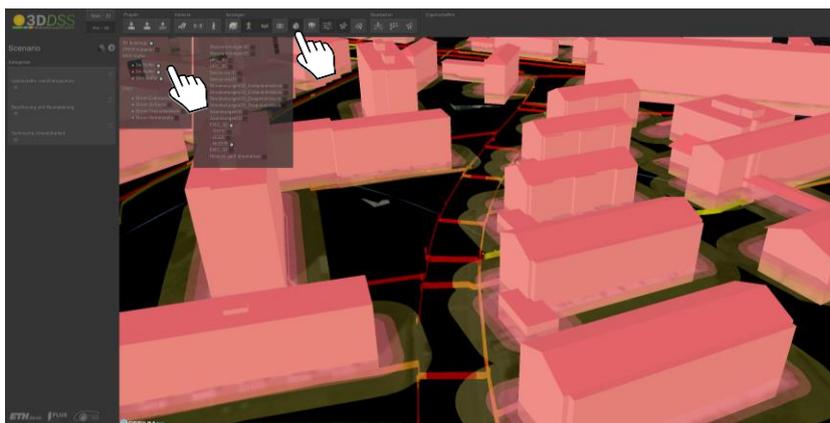
### 5.11.1 ÖREB-Kataster

Mit zusätzlichen Informationen kann die Analyse der Modellierungsergebnisse unterstützt werden. In der Fallstudie «Zürich» ist z. B. die Information relevant, ob Leitungen durch Wohn-, Industrie- und Gewerbe-, Zentrums- oder Erholungszonen etc. führen. Diese Information geht beispielsweise aus dem Kataster der öffentlich-rechtlichen Eigentumsbeschränkungen (ÖREB-Kataster) hervor. Das ÖREB-Kataster steht als Web Feature Service (WFS) im Geographischen Informationssystem des Kantons Zürich zur Verfügung<sup>14</sup>. Im 3D DSS werden mit Klick auf die Schaltflächen «3D-Gebäude» und dann «ÖREB-Kataster» diese Daten inklusive Legende direkt vom Kantonsserver aufgerufen. Durch diese Art des Zugriffs auf die Daten wird sichergestellt, dass der Datenlayer immer aktuell ist.



### 5.11.2 NISV-Buffer

Um zu analysieren, ob es ggf. Konflikte mit der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) gibt, lassen sich drei Buffer (3 m, 5 m, 10 m) um die Gebäude der Fallstudie «Zürich» mit Mausclick auf die Schaltflächen «3D-Gebäude» und dann «NISV-Buffer» einblenden.



Grundsätzlich lassen sich weitere räumliche Informationen auf die gezeigten Arten im 3D DSS einfügen.

<sup>14</sup> GIS-ZH; <https://www.geolion.zh.ch/geodatensatz/2281>

## 6 Verwendete Datensätze

Im Folgenden wird beschrieben, in welche Kategorien die 53 verwendeten Kriterien gegliedert wurden, was sie umfassen und welches Hauptziel ihnen zugeschrieben wurde. Die Kriterien wurden teilweise aus mehreren Datensätzen zusammengesetzt und orientieren sich am Bewertungsschema für Übertragungsleitungen (BFE 2013).

Tabelle 6: Kriterien, nach Kategorie und Hauptziel gegliedert.

Kategorie	Kriterium	Hauptziel
Umwelt-/Biotopschutz	UNESCO Biosphärenreservate	Ω <sub>2</sub> : Umweltschutz
	Trockenwiesen und -weiden: nationale Bedeutung	
	Trockenwiesen und -weiden: kantonale Bedeutung	
	Feuchtgebiete: nationale Bedeutung	
	Feuchtgebiete: kantonale Bedeutung	
	Moorbiotope: nationale Bedeutung	
	Moorbiotope: kantonale Bedeutung	
	Vogelschutzgebiete	
	Naturschutzgebiete (kantonale)	
	Schutzgebiete nach Jagdgesetz	Ω <sub>3</sub> : Landschaftsschutz
	Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler (BLN)	
	Moorlandschaften	
	Pärke: nationale Bedeutung	
	Pärke: regionale Bedeutung	
	UNESCO Welterbestätten	
	Landschaften mit hoher Schutzwürdigkeit	
	Landschaftsprägende charakteristische Objekte	
	Landwirtschaftszonen	
	Weinberge und Baumschulen	
Wälder		
Technische Umsetzbarkeit	Naturgefahrenzonen: Lawinen	Ω <sub>6</sub> : Verringerung von Risiken
	Naturgefahrenzonen: Überschwemmungen	
	Naturgefahrenzonen: Rutschungen	
	Naturgefahrenzonen: Felsstürze	
	Naturgefahrenzonen: Dolinen	Ω <sub>4</sub> : Umsetzbarkeit gewährleisten
	S1-Grundwasserzonen und Gewässerraum: absolutes Bauverbot	
	S2-Grundwasserzone: starke Baueinschränkung	
	Ungeeignetes Relief	
	Ungeeigneter geologischer Untergrund	
	Untergrundinfrastrukturanlagen	
	Verbleiben im selben Tal (valleyiness)	
Oberflächengewässer: Seen		
Oberflächengewässer: Flüsse		
Raumplanung	Historisch wichtige Orte und Gebiete	Ω <sub>3</sub> : Landschaftsschutz
	Flugplätze und -häfen	Ω <sub>6</sub> : Verringerung von Risiken
	Seilbahnen	
	Militäranlagen	Ω <sub>4</sub> : Umsetzbarkeit gewährleisten
	Kiesgruben	
	Spezielle Bahnen	
	Ungeeignete Exposition	Ω <sub>1</sub> : Schutz des menschlichen Lebensraums
	Gebiete innerhalb des Lärmimmissionsgrenzwerts von 40 dBA	
	Wohn-/Arbeits-/Mischzonen	
	Industriezonen	
	Tourismuszonen und Naherholungsgebiete	
	Öffentliche Kernzonen	
	Kulturgüterschutzobjekte: hohe Schutzwürdigkeit	
	Kulturgüterschutzobjekte: niedrige Schutzwürdigkeit	
	Potentielle Sichtbarkeit neuer Freileitungen	
	Breite Strassen und Eisenbahnlinien	Ω <sub>5</sub> : Bündelung erhöhen
	Bestehende Übertragungsleitungen	
	Öffentliche Verkehrszonen	
Tunnel		
Infrastrukturanlagen		

## 6.1 Kategorie «Umwelt-/Biotopschutz»

Die Kategorie «Umwelt-/Biotopschutz» beschreibt Einheiten der belebten und unbelebten Natur, deren Erhalt zwei Ziele verfolgt: Einerseits soll die charakteristische Gestalt der Landschaft bewahrt werden. Andererseits sollen Lebensräume (Biotope) geschützt und somit die Biodiversität durch den Erhalt der Ökosysteme gefördert werden. Die darin enthaltenen Datensätze beinhalten räumlich abgegrenzte Objekte, die dem Landschaftsschutz (Art. 2 ff NHG) oder dem Biotopschutz (Art. 18 ff NHG) unterstehen. Da Landschaftsschutz und Biotopschutz in ihrer Umsetzung häufig nicht voneinander getrennt werden können, werden sie im 3D DSS in derselben Kategorie aufgeführt.

### 6.1.1 Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung

Das Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung (BLN) umfasst die wertvollsten Landschaften und Naturdenkmäler der Schweiz. Das Ziel des BLN liegt darin, die landschaftliche Vielfalt der Schweiz und die charakteristischen Eigenschaften der Landschaften zu erhalten. Das Inventar umfasst einzigartige Landschaften, die aufgrund ihrer Ruhe, Ungestörtheit oder Schönheit besonders attraktiv sind. Der Bund ist gemäss Natur- und Heimatschutzgesetz (NHG, SR 451) verpflichtet, diese Gebiete zu schützen.

### 6.1.2 Feuchtgebiete

Um wertvolle Flussauen und gefährdete Amphibien zu schützen, hat der Bundesrat zwei Inventare in Kraft gesetzt: Das Bundesinventar der Auen von nationaler Bedeutung und das Inventar der Amphibienlaichgebiete von nationaler Bedeutung. Beide sind nach Art. 18a NHG geschützt und werden unter dem Layer «Feuchtgebiete: nationale Bedeutung» zusammengefasst. Der Layer «Feuchtgebiete: kantonale Bedeutung» umfasst Feuchtgebiete des REN-Datensatzes und weitere Auengebiete, welche nicht in einem nationalen Register eingetragen sind.

### 6.1.3 Landschaften mit hoher Schutzwürdigkeit

Zu den Landschaften mit hoher Schutzwürdigkeit gehören Geotope, die alpine Ruhezone, Landschaften von regionaler Bedeutung, kantonale Schutzzonen für Lebensräume und Landschaften und Inventar der Naturobjekte regionaler Bedeutung. Diese landschaftsprägenden Elemente können als Einzelobjekt oder als Fläche inventarisiert sein und sind Natur- und Heimatschutzgesetz (NHG, SR 451)

Geotope sind erdwissenschaftlich wertvolle Teile der Landschaft. Sie beinhalten wichtige Zeugen der Erdgeschichte und geben Einblick in die Entwicklung der Landschaft und des Klimas. Aus diesem Grund sind sie sowohl für die Öffentlichkeit, für den Landschafts- und Naturschutz, aber auch für die Forschung und den Schulunterricht von Bedeutung. Beispiele dafür sind u.a. Naturdenkmäler, Felsformationen, fossilreiche Steinbrüche, Moränenlandschaften, Höhlen, Quellen oder Wasserfälle. Obwohl Geotope in der Bundesgesetzgebung nicht explizit erwähnt werden, werden sie – je nach Ausprägung – über das Zivilgesetzbuch (ZGB), über das Raumplanungsgesetz (RPG) oder über das Natur- und Heimatschutzgesetz (NHG, SR 451) sowie über kantonale Schutzverordnungen geschützt.

### 6.1.4 Landschaftsprägende charakteristische Objekte

Zu den landschaftsprägenden charakteristischen Objekten gehören kulturelle Einzelobjekte, die den Charakter einer Landschaft prägen. Dazu wurden aus dem IVS- und dem swissTLM3D-Datensatz Kirchen, Kapellen, Klöster, Burgen, Schlösser, Ruinen, Hochkammine, Baumreihen, Türme und Mauern ausgewählt.

### 6.1.5 Moorbiotope

Zu den Moorbiotopen zählen Flachmoore und Hochmoore<sup>15</sup>. Moorbiotope sind über die Bundesverfassung (Art. 78 Abs. 5 BV) geschützt. Es dürfen darin weder Anlagen gebaut noch Bodenveränderungen vorgenommen werden. Ausgenommen sind Einrichtungen, die dem Schutz oder der bisherigen landwirtschaftlichen Nutzung der Moore «dienen». Das Datenmodell unterscheidet zwischen Moorbiotopen von nationaler oder regionaler Bedeutung. Ist ein Moorbiotop in beiden Registern eingetragen, wird es nur dem Layer mit dem nationalen Schutz zugewiesen, um die Schutzwirkung durch das Modell nicht zu überschätzen.

### 6.1.6 Moorlandschaften

Moorlandschaften sind durch die Anwesenheit von Mooren geprägt, wobei ihr moorfreier Teil zu den Mooren «in enger ökologischer, visueller, kultureller oder geschichtlicher Beziehung» steht (Art. 23b NHG).

Moorlandschaften sind ebenso wie Moorbiotope über die Bundesverfassung (Art. 78 Abs. 5 BV) geschützt. Im Gegensatz zu Art. 78 Abs. 5 BV differenziert das Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz (NHG, SR 451) und das darauf beruhende Ordnungsrecht jedoch zwischen Moorbiotopen und Moorlandschaften. Art. 23d Abs. 1 NHG lässt die Gestaltung und Nutzung von Moorlandschaften zu, soweit dies der Erhaltung der für die Moorlandschaften typischen Eigenheiten nicht widerspricht. Verlangt wird somit nach einer Schutzzielverträglichkeit.

Art. 23d NHG konkretisiert Art. 78 Abs. 5 BV im Hinblick auf die Bauten und Anlagen, die in Moorlandschaften grundsätzlich zulässig sind. Sodann ist zu prüfen, ob das Projekt mit den konkreten Schutzzielen der Moorlandschaft verträglich ist.

Bei Freileitungen – selbst solche, die von nationalem Interesse und standortgebunden sind (vgl. Art. 5 Abs. 2 Bst. d Moorlandschaftsverordnung) – fehlt es in der Regel an der Schutzzielverträglichkeit<sup>16</sup>, sodass sie in Moorlandschaften unzulässig sind.

### 6.1.7 Naturschutzgebiete

Zu den Naturschutzgebieten zählen insbesondere lokale und kantonale festgelegte Naturschutzgebiete, Pro-Natura-Naturschutzgebiete, Pflanzenschutzzonen, schützenswerte Naturobjekte und Naturschutzzonen. Smaragdgebiete (hohe Artenvielfalt) wurden trotz ihres fehlenden rechtlichen Status ebenso mitberücksichtigt, wobei diese im Studiengebiet weitgehend durch kantonale Naturschutzgebiete geschützt sind. Ebenso wurden Kerngebiete des Lebensraums «Trockenstandort» des RENDatensatzes und Gebiete des Waldnaturinventars des Kantons Bern dazugezählt.

### 6.1.8 Pärke

Pärke von nationaler Bedeutung orientieren sich am Prinzip der nachhaltigen Entwicklung, um einen ökologischen, ökonomischen und sozialen Zweck zu erfüllen. Sie schützen die natürlichen Lebensräume vieler Tier- und Pflanzenarten, was die Biodiversität fördert und die schönen Landschaften und ihre Kulturgüter bewahrt. Pärke von nationaler Bedeutung umfassen Nationalpärke, regionale Naturpärke und Naturerlebnispärke. Pärke von regionaler Bedeutung umfassen im Untersuchungsgebiet Zonen, die im kantonalen Richtplan des Kantons Bern unter «Elemente Naturpärke» registriert sind und nicht zu einem nationalen Register gehören. Der Bund ist gemäss Natur- und Heimatschutzgesetz (NHG, SR 451) verpflichtet, Pärke zu schützen.

---

<sup>15</sup> Anmerkung: Schwingrasenvorkommen wurden nicht explizit aufgeführt, da sich alle Schwingrasen im Untersuchungsgebiet in Moorbiotopen befinden und somit indirekt über die BV geschützt sind.

<sup>16</sup> Beachten Sie bitte, dass das 3D DSS zur Zeit nur Freileitungen modelliert. Im Gegensatz zu Freileitungen können Erdkabel schutzzielverträglich sein, wenn sie nicht wahrnehmbar sind (keine sichtbaren Schneisen hinterlassen). Dies muss jedoch im Einzelfall untersucht werden.

### 6.1.9 Schutzwürdige Feuchtgebiete

Als schutzwürdige Feuchtgebiete werden Gebiete aufgefasst, die gemäss Art. 18 NHG als schutzwürdiger Lebensraum gelten, aber nicht in einem nationalen Register enthalten sind. Dazu zählen kantonale Auengebiete, Feuchtgebiete des swissTLM3D-Datensatzes, Feuchtgebiete des Nationalen Ökologischen Netzwerks (REN), Elemente aus Gewässerrichtplänen, Fliessgewässerabschnitte mit hoher Artenvielfalt (Hotspot-Zonen) und Laichgebiete geschützter Tierarten, die ausserhalb des Bundesinventars liegen.

### 6.1.10 Schutzzonen nach Jagdgesetz (auf Säugetiere beschränkt)

Zu den Tierschutzzonen am Boden lebender Tiere zählen Wildtierschutzzonen, Wildruhezonen und Jagdbanngebiete. Der Schutz der wildlebenden Säugetiere wird durch das Jagdgesetz (JSG, SR 922) bestimmt.

### 6.1.11 Trockenwiesen und –weiden

Trockenwiesen und –weiden sind artenreiche Lebensräume, die von landwirtschaftlicher Nutzung geprägt sind. Da seit 1900 95% der Trockenwiesen und –weiden in der Schweiz verschwunden sind, hat der Bundesrat Trockenwiesen und –weiden von nationaler Bedeutung in einem Inventar nach Art. 18a NHG aufgenommen. Das Datenmodell unterscheidet zwischen Trockenwiesen und –weiden von nationaler oder kantonaler Bedeutung (insbesondere NW und OW).

### 6.1.12 UNESCO-Biosphärenreservate

UNESCO-Biosphärenreservate sind Modellregionen, in denen eine nachhaltige Entwicklung verwirklicht werden soll. Der Mensch ist dabei ein integrativer Bestandteil der Biosphäre. Somit werden nebst Naturschutzaspekten auch eine nachhaltige wirtschaftliche und soziale Entwicklung angestrebt. Biosphärenreservate werden von den Regierungen vorgeschlagen und von der UNESCO gemäss deren Anforderungen anerkannt. Sie unterstehen Nutzungseinschränkungen, da Eingriffe in die Biosphäre immer auch nachhaltig sein müssen.

### 6.1.13 UNESCO Weltnaturerbe

Das Übereinkommen zum Schutz des Kultur- und Naturgutes der Welt (Welterbekonvention, SR 0.451.41) hat zum Ziel, Kultur- und Naturgüter von aussergewöhnlichem universellem Wert als Bestandteil des Welterbes der ganzen Menschheit zu erhalten. Die 3 in der Welterbeliste aufgenommenen Naturgüter müssen «geschützt und bewahrt» werden. Obwohl ein UNESCO Weltnaturerbe in der Nähe des Untersuchungsgebiet liegt, wird es nicht tangiert und somit nicht in der Liste aufgeführt.

### 6.1.14 Vogelschutzzonen

Vogelschutzzonen werden aufgrund von Artenschutzprogrammen in Zusammenarbeit mit der EU separat aufgeführt. Zu den Vogelschutzzonen zählen Ramsargebiete und Wasser- und Zugvogelreservate.

### 6.1.15 Wald

Wälder spielen eine zentrale Rolle bei der Förderung der Biodiversität. Wälder wurden aus verschiedenen Quellen zusammengefasst und nicht weiter ausdifferenziert. Auch Pro-Natura-Wald, der u.a. privatem Recht untersteht, wurde in denselben Datensatz integriert.

## 6.2 Kategorie «Raumplanung»

Die Kategorie «Raumplanung» beschreibt Datensätze, die vor allem durch die Raumplanung und durch die Interaktion mit Menschen geprägt sind. Die darin enthaltenen Datensätze repräsentieren Gebiete, für welche der Bau von Leitungen gemäss der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) und der Raumplanungsverordnung (RPV) unterschiedlich gehandhabt wird.

### 6.2.1 Bestehende Übertragungsleitungen

Von den unterschiedlichen Typen an Leitungen werden vor allem Freileitungen als die Landschaft zerschneidende Elemente wahrgenommen. Der Bund verfolgt deshalb das Ziel, die Landschaftszerschneidung durch lineare Infrastrukturen zu bremsen. Neue Leitungen sollen deshalb – wenn möglich – mit bestehenden Leitungen gebündelt werden. Dieser Datensatz nimmt diesen Sachverhalt auf, indem er Gebiete, die sich ausserhalb einer bestimmten Distanz zu bestehenden Leitungen befinden, mit Kosten bestraft. Der Nutzer definiert somit die Kosten für den Fall, dass bewusst auf die Bündelung mit existierenden Leitungen verzichtet wird.

### 6.2.2 Breite Strassen und Eisenbahnlinien

Strassen, Autobahnen und Bahnlinien zerschneiden die Landschaft durch ihre lineare Form. Der Bund verfolgt deshalb das Ziel, die Landschaftszerschneidung durch lineare Infrastrukturen zu bremsen. Neue Leitungen sollen deshalb – wenn möglich – mit bestehenden Strassen ab 8 m Breite (Autobahnen, Autostrassen, breite Hauptstrassen) gebündelt werden. Dieser Datensatz nimmt diesen Sachverhalt auf, indem er Gebiete, die sich ausserhalb einer bestimmten Distanz zu bestehenden Strassen (ab 8 m Breite) befinden, mit Kosten bestraft. Der Nutzer definiert somit die Kosten für den Fall, dass bewusst auf die Bündelung mit breiten Strassen verzichtet wird.

### 6.2.3 Flugplätze und –häfen

Kleinere Flugplätze für Sportfliegerei sowie Zivil- oder Militärluftfahrt, die ein Hindernis für Freileitungen sein können, zählen genauso zu diesem Layer wie grössere Flughäfen.

### 6.2.4 Gebäude

Dieser Gebäudedatensatz umfasst alle Gebäude innerhalb des Studiengebiets wobei nicht zwischen Industrie-, Nutzungs- und Wohngebäuden unterschieden wird. Das bedeutet, dass aus NISV-Sicht nicht zwischen Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) und Orten für den kurzfristigen Aufenthalt unterschieden wird. Nebst OMEN sind auch OKA wie z.B. Lager- und Archivräume, Dachterrassen, Balkone, Wintergärten oder Autogaragen im Datensatz enthalten.

### 6.2.5 Gebiete innerhalb des Lärmimmissionsgrenzwerts von 40 dBA

Da der Lärmimmissionsgrenzwert einer Übertragungsleitung zu einem bewohnten Gebäude (OMEN) 40 dBA<sup>17</sup> beträgt, wurde mit dem Programm «HVLNoise 1.0» (Heutschi und Eggenschwiler 2010) berechnet, wie weit die Distanz reichen müsste, damit eine Freileitung die 40 dBA nicht überschreitet. Dabei wurde die Berechnung für das Tonnen- und für das Donaumastbild bei Regen durchgeführt (siehe Abbildung 10). Da zur Einhaltung der NISV zu Gebäuden<sup>18</sup> immer von einer Distanz von 100 m ausgegangen wurde und da die 40 dBA-Isolinie beim beiden Mastbildern unter dieser Distanz liegt, wurde der Faktor der Lärmimmission zwar berechnet, aber in der aktuellen Version des 3D DSS deaktiviert.

---

<sup>17</sup> 40 dBA entspricht dem Lärmpegel innerhalb einer Bibliothek.

<sup>18</sup> Der Gebäudedatensatz beinhaltet kein Attribut, um zwischen OMEN und OKA zu unterscheiden.

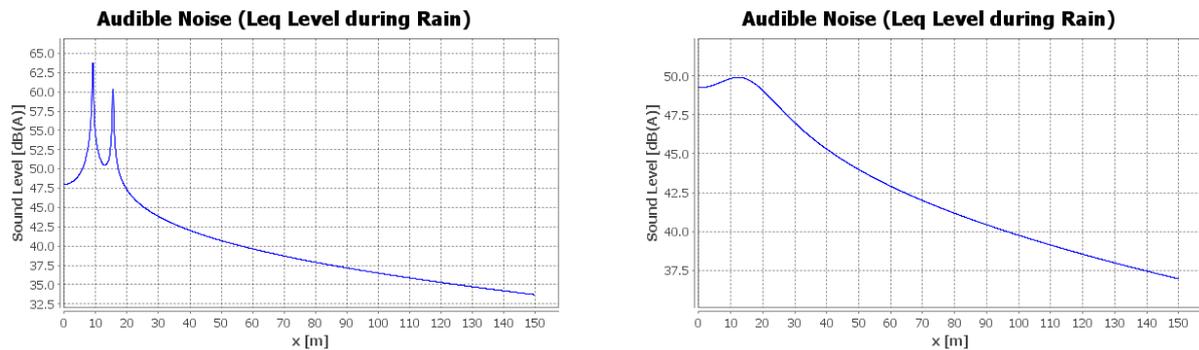


Abbildung 10: Outputs der Berechnung der distanzabhängigen Geräuschpegels von Corianargeräuschen bei Regen (HVLNoise 1.0), links für das Tonnen- und rechts für das Donau-Mastbild.

### 6.2.6 Historisch wichtige Orte und Gebiete

Historische Areale umfassen archäologisch wertvolle Gebiete sowie erhaltene Bauten, die historisch wertvoll sind. Dazu zählen u.a. Grabungsstätten, Kirchen, Kapellen, Burgruinen, Schlösser, historische Fabrikgelände, Steinkreise, etc.

Zudem wurden die Objekte des Bundesinventars der historischen Verkehrswege der Schweiz (IVS) dazugezählt, das Relikte von Verkehrswegen beinhaltet, die historisch wertvoll sind. Hierbei kann es sich um noch sichtbare gepflasterte Strassen aus der Römerzeit oder um überdeckte oder überbaute Verkehrswege handeln, die zwar vorhanden, aber nicht per se sichtbar sind. Auch Wegbegleiter wie z.B. historisch bedeutungsvolle Brunnen, Wegkreuze oder Markierungssteine werden zum Inventar gezählt. In Abhängigkeit ihrer Bedeutung wurden verschieden grosse Puffer um die ursprünglichen Objekte gelegt, wobei Verkehrswege bedeutungsvoller als ihre Wegbegleiter eingestuft wurden.

### 6.2.7 Industriezonen

Industriezonen gemäss Zonenplan.

### 6.2.8 Infrastrukturanlagen

Durch Infrastrukturanlagen können Dienste angeboten werden, die den Menschen zugutekommen. Als Infrastrukturanlagen gelten z.B. Abwasserreinigungsanstalten, Werkhöfe, Kehrlichtverbrennungsanlagen, Recyclinganlagen, Wasseraufbereitungswerke, Kraftwerke, Windräder, Umspannwerke, Dämme, Flughäfen, Militäranlagen, Funkantennen, etc.

### 6.2.9 ISOS-Objekte

Das Bundesinventar der schützenswerten Ortsbilder der Schweiz von nationaler Bedeutung (ISOS) beinhaltet Objekte, die für das Ortsbild einer Gemeinde charakteristisch und äusserst wertvoll sind. Es handelt sich um Objekte mit nationaler Wichtigkeit, die einer besonderen Schutzwirkung durch den Bund unterstehen. Um Objekte mit hoher Schutzwürdigkeit wurde ein Puffer von 300 m gelegt, während für Objekte mit geringer Schutzwürdigkeit ein Puffer von 50 m gewählt wurde. Diese Pufferradien wurden im Rahmen einer Vorstudie eruiert.

### 6.2.10 Kulturgüterschutzobjekte

Kulturgüterschutzobjekte (KGS) repräsentieren schützenswerte Kulturgüterobjekte, die historisch und kulturell wertvoll sind. KGS-Objekte werden in A- und B- Objekte eingeteilt, wobei KGS-A-Objekte schützenswerter als KGS-B-Objekte sind. Sie können eine lokale, regionale oder überregionale bis nationale Bedeutung haben, wobei KGS-A-Objekte mit nationaler Bedeutung u.a. auch im ISOS-Inventar

aufgeführt werden können. KGS-A-Objekten wurde gegenüber KGS-B-Objekten eine höhere Bedeutung und somit ein grösserer Pufferradius zugesprochen.

#### 6.2.11 Kiesgruben

Kiesgruben wurden in einem separaten Layer zusammengefasst, da sie sich als Industriestandorte durch den Abbau von Kies im Laufe der Zeit wandeln. Aufgrund der landschaftlichen Vorbelastung des Tagebaus bildet die Überspannung von Kiesgruben eine Möglichkeit, entfernte Gebiete vor dem Bau einer Freileitung zu entlasten bzw. zu schonen. Der Bau eines Erdkabels durch eine Kiesgrube kann zwar Ressourcen schonen, muss aber auf jeden Fall im Detail geklärt werden.

#### 6.2.12 Landwirtschaftszonen

Dieser Datensatz enthält Zonen, die landwirtschaftlich genutzt werden. Der Datensatz unterscheidet nicht hinsichtlich unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung, sondern bewertet alle Nutzungsarten gleich. Als Quelle diente dabei der europäische Datensatz CORINE Land Cover 2012. Bestockte Flächen wurden in einem separaten Layer aufgeführt, da sie schärferen Regeln bezüglich der Bebauung unterliegen.

#### 6.2.13 Militäranlagen

Da Militäranlagen mechanisch stark beansprucht werden, muss im Voraus geprüft werden, ob der Betrieb und Unterhalt einer Freileitung oder eines Erdkabels nicht zu grossen Risiken unterliegt. Aus diesem Grund wurden Militäranlagen separat aufgeführt.

#### 6.2.14 Öffentliche Kernzonen

Dieser Datensatz umfasst öffentlich zugängliche Zonen. Der Datensatz unterscheidet aus NISV-Sicht nicht zwischen Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) wie z.B. Schulen oder Spitäler und Orten für den kurzfristigen Aufenthalt (OKA) wie z.B. Plätze, Kirchen, Konzert- oder Theatersäle und Aussichtsterrassen. Sport- und Freizeitzone sind separat aufgeführt und sind nicht in diesem Datensatz enthalten.

#### 6.2.15 Öffentliche Verkehrszonen

Unter den öffentlichen Verkehrszonen werden Orte für den kurzfristigen Aufenthalt (OKA) zusammengefasst, die vor allem über den motorisierten Individualverkehr zugänglich sind. Hierzu gehören Parkplatzareale, Rastplatzareale, Fahrareale, Verkehrsflächen und Verkehrszonen.

#### 6.2.16 Potentielle Sichtbarkeit neuer Übertragungsleitungen

Die Sichtbarkeit einer potentiellen neuen Freileitung wurde durch die Anwendung des Verfahrens nach Grassi u.a. (2014) berechnet. Dabei wird auf jeder Pixelzelle innerhalb des Untersuchungsgebiet berechnet, von wie vielen anderen Pixeln ein Mast von 80 m Höhe gesehen werden würde. Für diese Pixel wird die Störwirkung berechnet, die von der Distanz abhängt: Je näher man sich an der Freileitung befindet, desto höher ist die Störung. Aufgrund der Studie von Nohl (1993) wurde ab einer Distanz von 2 km eine Störwirkung von null angenommen.

Da der Bau eines Erdkabels durch niedergehaltene Bäume eine sichtbare Schneise in einem Wald hinterlassen würde, wurde dasselbe Verfahren auf eine potentielle Waldschneise angewendet. Die Frage hierbei lautete, von wie vielen Pixeln eine Schneise in einem Wald sichtbar wäre, falls dort ein Erdkabel gebaut werden würde.

#### 6.2.17 Seilbahnen

Seilbahnen wurden vom swissTLM3D-Datensatz extrahiert und müssen insbesondere beim Bau von Freileitungen berücksichtigt werden.

### 6.2.18 Spezielle Bahnen

Zu den speziellen Bahnen gehören Skilifte und Förderbänder, da sie den Bau eines Erdkabels erschweren können.

### 6.2.19 Tourismuszonen und Naherholungsgebiete

Bei den Tourismuszonen handelt es sich explizit um Zonen, die touristisch genutzt werden. Sie heben sich daher von den separat aufgeführten Freizeit- und Naherholungsgebieten ab. Zu den Naherholungsgebieten zählen Stadtpärke, Friedhöfe, Sportanlagen und Rennbahnen, also Orte für den kurzfristigen Aufenthalt (OKA), an denen Menschen ihre Freizeit verbringen.

### 6.2.20 Tunnel

Zu diesem Kriterium gehören bestehende, der Öffentlichkeit bekannte Tunnel und solche, die in den kantonalen Richtplänen für einen geplanten Bau erfasst sind, die der Öffentlichkeit bekannt sind und aus dem swissTLM3D-Datensatz extrahiert wurden.

### 6.2.21 Ungeeignete Exposition

Schoinas (2018) stellte fest, dass Gebiete, die eine Exposition von 111.5° bis 292.5° Azimutabweichung zum Nordpol aufweisen, für den Bau von Erdkabeln aufgrund der erhöhten Bodenerwärmung zu höheren Leistungsverlusten führen könnte. Aus diesem Grund wurden alle Gebiete mit dieser Exposition (WNW bis ESE) eruiert und in einem Layer zusammengefasst.

### 6.2.22 Wohn-, Arbeits- und Mischzonen

Zu diesen Zonen zählen aus NISV-Sicht Orte mit empfindlicher Nutzung (OMEN) – insbesondere Wohnzonen, Arbeitszonen und Mischzonen, in denen gewohnt und gearbeitet wird.

## 6.3 Kategorie «Technische Umsetzbarkeit»

Die Kategorie «Technische Umsetzbarkeit» beschreibt Datensätze, die den Bau von Leitungen aufgrund geodeterministischer Voraussetzungen technisch oder gesetzlich hemmen bzw. verunmöglichen. Diese Kategorie beinhaltet Datensätze, deren Zonen entweder verboten, zu gefährlich oder zu riskant sind, um sie zu bebauen. Die darin enthaltenen Datensätze repräsentieren landschaftliche Einheiten oder amtlich festgelegte Zonen, die durch unterschiedliche Verordnungen des Bundes geregelt sind.

### 6.3.1 Naturgefahrenzonen

Naturgefahrenzonen werden kantonal festgelegt und umfassen Zonen, die durch Hochwasser, Lawinen, Murgänge, Rutschungen oder Einstürzen (Dolinen) gefährdet sind. Für die Modellierung wurden ausschliesslich Zonen ausgewählt, in denen die Wahrscheinlichkeit hoch ist, dass innerhalb von 30 Jahren ein mittelschweres Naturereignis eintritt. Generell gilt, dass die Schwere eines Ereignisses zunimmt, je seltener es vorkommt. Ein Zeithorizont von über 30 Jahren für den Eintritt eines schweren Naturereignisses, das eine grössere Fläche betrifft, wurde nicht berücksichtigt, da diese Ereignisse sehr selten auftreten und Schäden – sofern sie tatsächlich entstanden sind – punktuell auftreten und somit repariert werden können.

Zu beachten ist, dass Erdbeben nicht zu den vom Bund beschriebenen Naturgefahren zählen. Obwohl die Wahrscheinlichkeit, dass ein Erdbeben an einer bestimmten Stelle über die ganze Schweiz nicht gleich verteilt ist, wird die Gefährdung durch Erdbeben vernachlässigt, da sie aufgrund der geschätzten maximalen Magnitude pro mögliche Eintrittsperiode Leitungen nur unwesentlich beeinflussen.

### 6.3.2 Oberflächengewässer

Oberflächengewässer stellen natürliche Barrieren für den Bau einer Leitung dar. Sie sind nicht unpassierbar, da die Verlegung von Seekabeln technisch möglich ist und Flüsse durch Spülbohrungen unterquert werden können. Seekabel stellen die Planer jedoch vor Herausforderungen und Zusatzkosten, da u.a. Umwandlungsstationen und bauliche Massnahmen nötig sind, um ein solches Projekt zu realisieren. Daher sollte die Wahl des Widerstands für die Durchquerung eines Sees diese Überlegungen mitberücksichtigen.

### 6.3.3 S1-Grundwasserzonen und Gewässerraum

S1-Grundwasserzonen stellen Kernzonen der Grundwasserschutzzonen dar. Auf S1-Grundwasserschutzzonen und im Gewässerraum ist der Bau jeglicher Anlagen verboten. Grundwasserzonen sind über die Gewässerschutzverordnung (GSchV) geregelt.

### 6.3.4 S2-Grundwasserzonen und Grundwasserschutzareal

S2-Grundwasserzonen stellen engere Schutzzonen der Grundwasserschutzzonen dar. Auf S2-Grundwasserschutzzonen und im Grundwasserschutzareal untersteht der Bau von Anlagen bestimmter Restriktionen, um zu verhindern, dass «das Grundwasser durch Grabungen und unterirdische Arbeiten nahe von Grundwasserfassungen und -anreicherungsanlagen verunreinigt wird» (Art 123.a GSchV). Grundwasserzonen sind über die Gewässerschutzverordnung (GSchV) geregelt.

### 6.3.5 Gewässerschutzbereich Ao

Der Gewässerschutzbereich Ao umfasst das oberirdische Gewässer und dessen Uferbereiche, soweit dies zur Gewährleistung einer besonderen Nutzung erforderlich ist (GSchV Anhang 4 Ziffer 112).

### 6.3.6 Gewässerschutzbereich Au

Der Gewässerschutzbereich Au umfasst die nutzbaren unterirdischen Gewässer sowie die zu ihrem Schutz notwendigen Randgebiete (GSchV Anhang 4 Ziffer 111).

### 6.3.7 Zuströmbereich Zo

Der Zuströmbereich Zo umfasst das Einzugsgebiet, aus dem der grösste Teil der Verunreinigung der oberirdischen Gewässer stammt (GSchV Anhang 4 Ziffer 114).

### 6.3.8 Zuströmbereich Zu

Der Zuströmbereich Zu umfasst das Gebiet, aus dem bei niedrigem Wasserstand etwa 90 Prozent des Grundwassers, das bei einer Grundwasserfassung höchstens entnommen werden darf, stammt (GSchV Anhang 4 Ziffer 113).

### 6.3.9 Zonen Sh und Sm

Die Zonen Sh und Sm sollen u.a. verhindern, dass die Hydrodynamik des Grundwassers durch bauliche Eingriffe verändert wird, wobei Sh Gebiete mit hoher Vulnerabilität und Sm Gebiete mit mindestens mittlerer Vulnerabilität bezeichnen (GSchV Anhang 4 Ziffer 113). Im Untersuchungsgebiet liegen aktuell keine Datensätze vor, von welchen sich Sh- und Sm-Zonen ableiten liessen.

### 6.3.10 Ungeeigneter geologischer Untergrund

Ein für den Bau von Hochspannungsleitungen ungeeigneter Untergrund wurde aus der Bodenbedeckung des swissTLM3D-Datensatzes (Lockergestein, Gletscher, Fels), aus den Baugrundklassen (Lockergestein, Sand, Kies, Ton, organische und weiche Ablagerungen) und aus der Erdwärmekarte des Kantons Luzern abgeleitet. Hierbei wurden alle lockeren oder instabilen Untergrundmaterialien

ausgewählt, da sie den Bau einer Hochspannungsleitung technisch nicht in jedem Fall verunmöglichen, aber zumindest erschweren.

### 6.3.11 Ungeeignetes Relief

Als ungeeignetes Relief für den Bau einer Leitung wurden Gebiete eingestuft, die eine Steigung von mindestens 55° aufweisen oder über 1300 m.ü.M. liegen. Der Bau ist zwar nicht unmöglich, aber mit beträchtlichen Mehrkosten verbunden. Daher sollte die Wahl des Widerstands für ein ungeeignetes Relief diese Überlegungen mitberücksichtigen.

Die Steigung von 55° wurde im Rahmen einer Expertenbefragung eruiert, während eine Vorstudie zum Schluss führte, dass der Mittelwert plus eine Standardabweichung aller Masten in der Schweiz unter 1300 m liegt.

### 6.3.12 Untergrundinfrastrukturanlagen

Obwohl nicht alle Untergrundinfrastrukturanlagen in Karten eingetragen oder zumindest nicht öffentlich zugänglich sind, wurden die bekannten unterirdischen Anlagen aus dem swissTLM3D-Modell (Lüftungsschacht, unterirdisches Gebäude und Wasserbecken) und aus der Hinderniskartei des Kantons Bern ausgewählt. Solche Anlagen sollten für den Bau eines Erdkabels umgangen werden.

### 6.3.13 Verbleiben im selben Tal (valleyness)

Eine Bergkrete zu überwinden stört (im Falle einer Freileitung) nicht nur das Landschaftsbild, sondern ist auch technisch aufwendig und teuer. Aus diesem Grund kann das Verbleiben im Tal belohnt werden, während das Überwinden einer Bergkrete bestraft wird. Zu diesem Zweck wurde der Algorithmus von Straumann (2010) auf das Relief angewendet, das die Täler anhand des (relativen) Talbodens identifiziert. Die drei valleyness-Karten unterscheiden sich hauptsächlich darin, ob der Talboden grosszügig oder ähnlich einer Schlucht modelliert wird und wie realitätsgetreu die Modellierung dem Relief nachempfunden ist. Dies wird über einen Parameter gesteuert, der festlegt, wie gross ein Wassereinzugsgebiet mindestens sein muss, um einen Wasserstrom zu initialisieren. Eine kleine Fläche führt dazu, dass auch kleine Bäche modelliert werden (siehe Abbildung 11 links), was dem wahren Relief eher nachempfunden ist, während eine grosse Fläche die Verästelung eines Flusses auf seine Hauptzweige reduziert und das Profil glättet (siehe Abbildung 11 rechts).

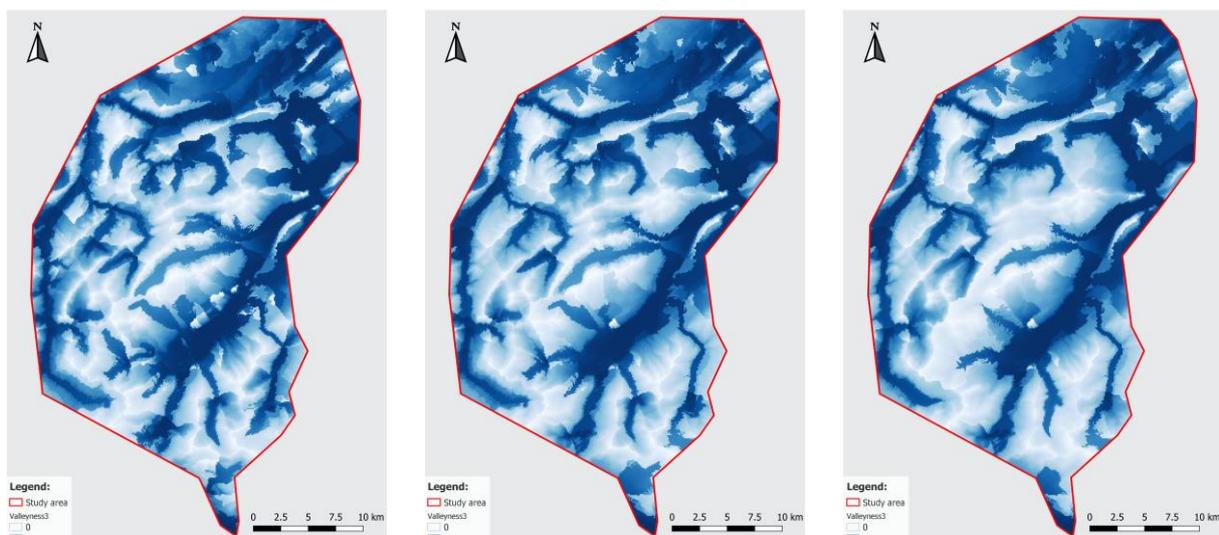
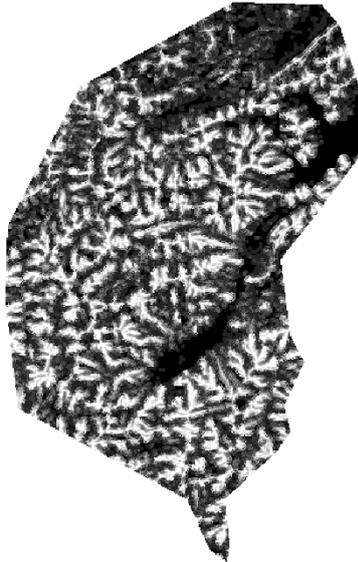


Abbildung 11: Grundsätzliches Konzept der «valleyness» im Untersuchungsgebiet mit einem Einzugsgebiet von 300 Zellen (links), 500 Zellen (Mitte) oder 700 Zellen (rechts). 100 Zellen entsprechen 1 km<sup>2</sup>.

Die Auflösung der valleyness wurde auf 16 bit (signed) festgelegt. Niedrige Werte stehen für einen geringen Widerstand, was die Hochspannungsleitung dazu bringt, im Tal zu bleiben während hohe Widerstandswerte die Leitung daran hindern sollen, eine Bergkrete zu überqueren. Konkret können die Nutzerinnen und Nutzer zwischen folgenden Optionen wählen (siehe Abbildung 12)

- Valleyness mit 300 Zellen Einzugsgebiet, 1.5° kritischem Winkel und einem Modell, das die valleyness anhand der Geländeconvexität berechnet. → Relief überhöht mit mässiger Talbodenberechnung.
- Valleyness mit 700 Zellen Einzugsgebiet, 1.5° kritischem Winkel und einem Modell, das die valleyness anhand der Geländeconvexität berechnet. → Reliefgetreu mit grosszügiger Talbodenberechnung.
- Valleyness mit 700 Zellen Einzugsgebiet, 1.5° kritischem Winkel und einem Modell, das die valleyness anhand der Geländeconvexität und der Höhe über Meer berechnet. → Geglättet mit schmaler Talbodenberechnung (hohe Schluchtenbildung).

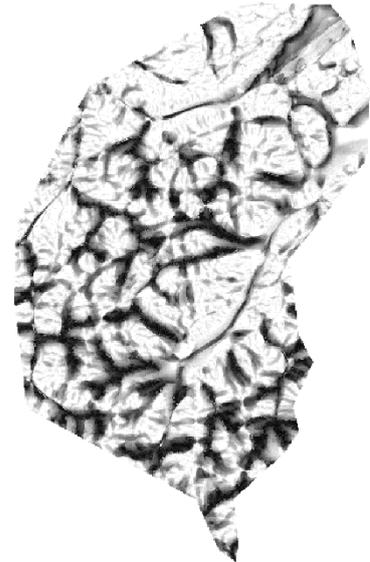
Valleyness 700 cells, convexity model



Valleyness 300 cells, convexity model



Valleyness 300 cells, combined model



Valleyness (15 bit resolution)

■ 0

□ 32767

0 5 10 15 20 km



Abbildung 12: Im 3D DSS eingesetzte valleyness-Modelle. 0=Talboden; 32767=maximaler Widerstand beim Überwinden einer Bergkrete.

## Literaturverzeichnis

- Belton, Valerie, und Theodor Stewart. 2002. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Dordrecht (Netherlands): Springer Science & Business Media.
- BFE. 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>.
- Dijkstra, Edsger W. 1959. „A note on two problems in connexion with graphs“. *Numerische mathematik* 1 (1): 269–271.
- 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.
- Heutschi, Kurt, und Kurt Eggenschwiler. 2010. „Aufarbeitung der CONOR Forschungsergebnisse für den Vollzug“. 452574. Dübendorf (Switzerland): Empa – Material Science & Technology, Abt. Akustik.
- Hwang, Ching-Lai, und Kwangsun Yoon. 1981. *Multiple attribute decision making: methods and applications : a state-of-the-art survey*. Bd. 186. Lecture notes in economics and mathematical systems. Berlin (Germany): Springer.
- Malczewski, Jacek, und Claus Rinner. 2015. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Advances in Geographic Information Science. Berlin (Germany): Springer.
- Moncecchi, Daniele. 2020. „Exploiting Valley Extraction Algorithms for Improving Power Transmission Line Routing“. Master Thesis, Milano (Italy): Politecnico di Milano, Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale.
- Nohl, Werner. 1993. „Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes durch mastenartige Eingriffe“. Werkstatt für Landschafts- und Freiraumentwicklung.
- Piveteau, Nadine. 2017. „A Novel Approach to the Routing Problem of Overhead Transmission Lines“. Master Thesis, Zurich (Switzerland): University of Zurich, Department of Geography.
- Rheinert, Pascal. 1999. „Freileitungen minimaler Sichtbarkeit und deren gleichzeitige Optimierung nach mehreren Kriterien“. Dissertation, Saarbrücken (Germany): Universität Saarbrücken.
- Schito, Joram. 2020. „Realistic Modeling of Power Transmission Lines with Geographic Information Systems“. Dissertation, Zurich (Switzerland): ETH Zurich.
- Schito, Joram, Joshu Jullier, und Martin Raubal. 2019. „A framework for integrating stakeholder preferences when deciding on power transmission line corridors“. *EURO Journal on Decision Processes*, Special Issue on Environmental Decisions, 7 (3–4): 159–195. <https://doi.org/10.1007/s40070-019-00100-w>.
- Schito, Joram, Daniele Moncecchi, und Martin Raubal. 2020. „Determining transmission line path alternatives using a valley-finding algorithm“. *Manuscript submitted for publication. Under review in Computers, Environment and Urban Systems*.
- Schito, Joram, Ulrike Wissen Hayek, und Martin Raubal. 2018. „Enhanced multi criteria decision analysis for planning power transmission lines“. In *Proceedings 10th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2018)*, herausgegeben von Stephan Winter, Amy Griffin, und Monika Sester. Bd. 114. Melbourne (Australia): LIPICS. <https://doi.org/10.4230/LIPICS.GIScience.2018.15>.
- Schoinas, Konstantinos. 2018. „Planning Earth Cables with GIS“. Master Thesis, Zurich (Switzerland): ETH Zurich, Institute of Cartography and Geoinformation.
- Song-Zinggeler, Julia. 2016. „Usability Testing of Decision-Support System for Power Line Planning“. Master Thesis, Zurich (Switzerland): ETH Zurich, Planning of Landscape and Urban Systems.
- Straumann, Ralph. 2010. „Extraction and Characterisation of Landforms from Digital Elevation Models: Fiat Parsing the Elevation Field“. Dissertation, Zurich, Switzerland: University of Zurich, Department of Geography.