

T-RIX – Das neue TR6-Kriterium zur Klassifizierung der orografischen Komplexität bei der Erstellung von Windgutachten

Dominik Adler, GEO-NET Umweltconsulting GmbH (stellvertretend für die AG Komplexität des AK Konformität im FA Windpotential)

FGW e.V. - Fördergesellschaft für Windenergie und andere Dezentrale Energien

Oranienburger Straße 45
10117 Berlin

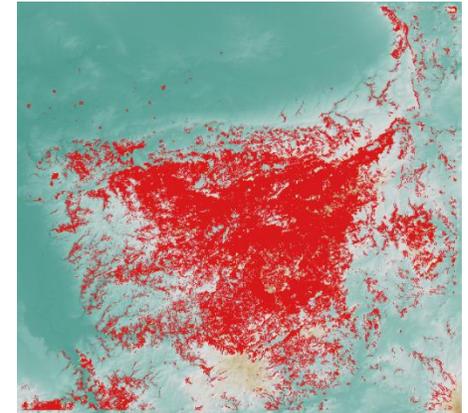




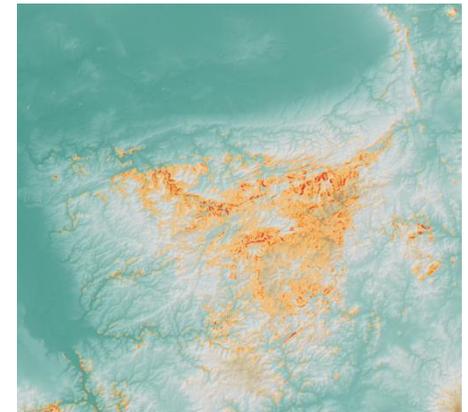
Überprüfung des Umstiegs von der Ed. 3 auf die Ed. 4 der 61400-1 bei der Bewertung der Komplexität im Sinne der TR6 im AK Konformität:

- Diskussion und Austausch von Erfahrungswerten der Mitglieder mit dem Fazit, dass nach den Kriterien der Ed. 4 viele schwierig zu modellierende Standorte noch als „einfach“ klassifiziert werden.
- Problematisch, weil dann (Entfernungs-) Grenzwerte der Repräsentativität so festgelegt werden müssten, dass sie auch für solches Gelände noch passen => Verhinderung ansonsten möglicherweise denkbarer Lockerungen für „wirklich“ einfaches Gelände.
- Auch das Komplexitätskriterium nach Ed. 3 erschien im Verlauf der Diskussion zunehmend fragwürdig für den Anwendungsfall Windpotenzialermittlung – für den es auch gar nicht gedacht und entworfen wurde.
- Bildung einer AG mit vier Mitgliedern (Carsten Albrecht, Johannes Cordes, Martin Richter-Rose, Dominik Adler)
- **Ziel: Entwicklung eines Komplexitätsmaßes bzw. Untersuchung bestehender Komplexitätsmaße auf deren Eignung anhand eines aufgestellten Kriterienkataloges und Anwendungsfällen**

IEC 61400-1 Ed. 3



IEC 61400-1 Ed. 4





Umfrage unter den Mitgliedern der AG Komplexität (vorgestellt im FA WP März 2022, Aktualisierung Mai 2022)

Kriterium	Derzeit erfüllt	Wichtigkeit	Umsetzbarkeit
Design für Wind- und Ertragspotenzial	0,0	1,8	1,0
Projektgebiet üblicher Größe (um 40x40km)	0,0	1,4	0,4
Bewertung der Ähnlichkeit von Standorten	0,2	2,0	0,6
Unternehmensinterne Validierung	0,6	1,6	1,4
Öffentlich zugängliche Validierung	0,4	1,4	1,8
öffentlich belegte Eignung für Wind allgemein	0,0	1,4	0,8
Anwendbarkeit mit vertretbarem Aufwand	1,8	1,8	1,0
Berücksichtigung der Windrichtungsverteilung	1,2	2,0	1,0
Berücksichtigung Geländehöhenvariation	1,4	1,8	0,0
Berücksichtigung Geländehöhensteigung	1,4	1,8	0,2
Gute Differenzierung zwischen nach Gutachtereinschätzung tatsächlich schwer zu modellierenden und einfach zu modellierenden Windparkarealen	0,8	1,8	1,6
Anwendbarkeit von Modellklassen (WAsP => CFD)	0,2	1,0	1,8
Unabhängigkeit der Einschätzung von der Nabenhöhe	0,0	1,4	0,6
fließendes (nicht-binäres) Kriterium zur Bewertung der Orographie	0,2	2,0	0,6

- Klassifikation der Kriterien wie folgt:
 1. Mit der aktuellen Situation erfüllt/abgedeckt. (0: gar nicht erfüllt, 1: teilweise erfüllt, 2: erfüllt).
 2. Wichtigkeit. (0: weniger wichtig, 1: mittel, 2: wichtig).
 3. Anforderungen an die Umsetzbarkeit. (0: Leicht umsetzbar, 1: mittlerer Aufwand, 2: Aufwändig).

Nach übereinstimmender Einschätzung waren mit recht geringem Aufwand signifikante Verbesserungen zu erreichen

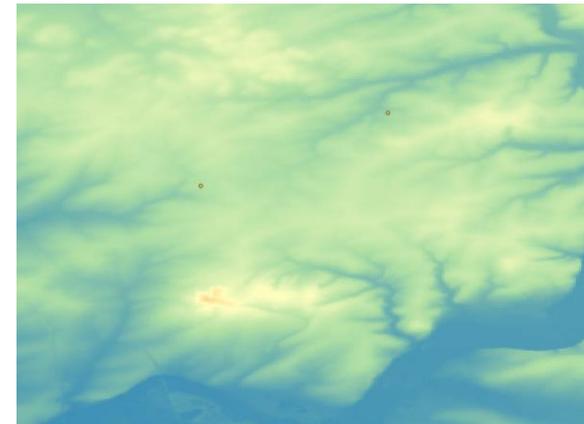


Standort	Komplexität A	Standardabweichung	Anzahl Bewertungen	Komplexität B	Standardabweichung	Anzahl Bewertungen	Betrachteter Radius	Standardabweichung	Anzahl Bewertungen	Orographische Ähnlich	Standardabweichung	Anzahl Bewertungen	Repräsentativität	Windverhältnisse	Standardabweichung	Anzahl Bewertungen	Gelbe Linie	Standardabweichung	Anzahl Bewertungen	Rote Linie	Standardabweichung	Anzahl Bewertungen	Unsicherheitszuschlag	"rot"	Standardabweichung	Anzahl Bewertungen
1	1,00	0,00	19	1,00	0,00	19,00	7527	5926	19	1,16	0,37	19	3,63	1,64	19	9,74	2,54	19,00	16,47	2,48	19	5,37	2,11	19		
2	5,47	1,12	19	5,58	1,43	19,00	4401	4364	19	2,95	1,39	19	3,26	1,41	19	3,45	2,40	19,00	6,73	2,79	19	6,13	2,11	19		
3	5,33	0,97	18	5,56	1,20	18,00	4291	4531	18	6,89	1,64	18	7,28	1,93	18	1,67	1,39	18,00	3,22	2,31	18	6,12	2,54	17		
4	4,44	1,50	18	5,28	1,64	18,00	4847	4690	18	5,28	1,99	18	5,56	1,69	18	3,64	1,96	18,00	7,21	4,09	18	7,07	2,97	18		
5	5,89	1,41	18	6,00	1,57	18,00	4931	4697	18	4,44	1,54	18	4,94	1,47	18	3,01	1,63	18,00	6,08	3,38	18	6,38	2,06	18		
6	9,24	0,83	17	9,29	0,69	17,00	4991	4873	17	4,59	1,50	17	6,47	2,29	17	1,55	0,65	17,00	3,31	2,13	17	7,13	2,22	16		
7	1,19	0,40	16	1,19	0,40	16,00	8512	10021	16	1,63	0,89	16	3,75	1,65	16	8,51	2,52	16,00	15,59	2,70	16	5,66	2,26	16		
8	6,81	1,83	16	6,88	1,75	16,00	5199	4750	16	2,94	1,12	16	3,50	1,26	16	3,34	1,25	16,00	6,72	2,31	16	7,03	2,41	16		
9	6,88	1,93	16	7,63	1,75	16,00	4918	4556	16	6,63	2,19	16	7,63	1,96	16	1,84	1,03	16,00	3,60	2,00	16	6,70	2,84	15		
10	4,94	1,44	16	5,06	1,61	16,00	4991	4647	16	4,00	1,37	16	4,13	1,41	16	3,93	1,89	16,00	7,54	3,53	16	6,28	2,21	16		
11	6,67	1,35	15	5,67	1,54	15,00	4905	4738	15	5,20	1,15	15	5,40	1,30	15	2,79	1,08	15,00	5,51	2,97	15	6,63	2,09	15		
12	2,06	1,00	16	2,06	1,00	16,00	5338	5005	16	1,94	0,85	16	2,69	1,01	16	8,38	1,71	16,00	14,56	2,06	16	5,66	2,22	16		
13	5,27	1,87	15	5,67	1,88	15,00	5590	5117	15	5,60	1,55	15	7,13	1,51	15	4,09	2,46	15,00	7,83	3,88	15	7,00	3,11	15		
14	5,00	1,15	16	5,06	1,84	16,00	4730	4705	16	6,50	1,75	16	7,44	1,50	16	3,44	1,38	16,00	6,97	3,12	16	6,09	2,49	16		
15	7,31	1,45	16	7,50	1,46	16,00	4824	4735	16	5,88	2,13	16	6,63	1,78	16	2,33	1,24	16,00	4,99	2,89	16	6,37	2,13	15		
16	4,31	1,74	16	3,63	1,31	16,00	4813	4728	16	4,94	1,95	16	5,25	1,77	16	4,69	2,25	16,00	9,28	3,97	16	6,63	2,21	16		
17	2,53	1,01	17	2,65	1,11	17,00	6413	5205	17	3,29	1,36	17	5,18	2,10	17	7,88	2,00	17,00	13,79	2,77	17	5,82	2,32	17		
18	3,94	1,77	16	4,13	1,78	16,00	5230	4791	16	2,94	1,24	16	3,50	1,32	16	5,94	2,50	16,00	11,53	4,65	16	6,25	2,14	16		
19	1,06	0,25	16	1,13	0,50	16,00	6845	5371	16	1,38	0,62	16	3,81	2,29	16	7,88	2,50	16,00	14,06	2,24	16	5,38	2,38	16		
20	2,50	0,89	16	2,25	0,77	16,00	5678	4758	16	2,44	1,09	16	2,75	1,53	16	8,28	2,25	16,00	14,05	3,26	16	5,88	2,27	16		
21	3,25	1,48	16	3,25	1,29	16,00	5272	4669	16	3,19	1,83	16	3,69	1,58	16	6,71	2,25	16,00	12,07	3,17	16	6,13	2,38	16		
22	4,19	2,14	16	2,31	1,01	16,00	5887	4982	16	5,00	2,31	16	6,31	2,12	16	5,79	2,80	16,00	11,00	4,26	16	6,28	2,29	16		
23	6,88	1,82	16	6,81	1,91	16,00	5876	4789	16	3,88	1,26	16	4,63	1,36	16	3,31	2,13	16,00	6,63	3,34	16	6,63	2,15	16		
24	4,50	1,51	16	4,19	1,64	16,00	5271	4688	16	3,13	0,81	16	3,88	0,81	16	4,61	2,23	16,00	9,01	3,33	16	6,31	2,21	16		
25	1,40	0,63	15	1,67	0,62	15,00	6134	5135	15	2,13	0,74	15	2,93	0,96	15	8,65	1,66	15,00	15,50	1,74	15	5,87	2,22	15		
26	9,13	0,96	16	9,25	0,77	16,00	4699	4708	16	4,38	2,33	16	5,63	2,50	16	1,40	0,52	16,00	3,23	2,03	16	7,38	2,37	16		
27	5,47	1,13	15	5,40	1,72	15,00	5056	4743	15	5,27	2,19	15	6,00	2,04	15	3,60	2,21	15,00	7,05	3,23	15	6,43	2,03	15		
28	2,00	0,52	16	2,06	0,68	16,00	6396	5042	16	2,13	1,15	16	2,63	1,45	16	8,29	2,05	16,00	14,71	2,75	16	6,00	2,21	16		
29	4,76	1,82	17	5,76	1,56	17,00	5765	4667	17	4,29	1,40	17	5,71	1,31	17	4,00	0,98	17,00	8,44	2,72	17	6,56	2,09	17		
30	5,75	1,81	16	6,06	1,69	16,00	5053	4725	16	4,63	1,63	16	5,88	1,71	16	3,58	2,23	16,00	6,88	2,90	16	6,66	2,21	16		

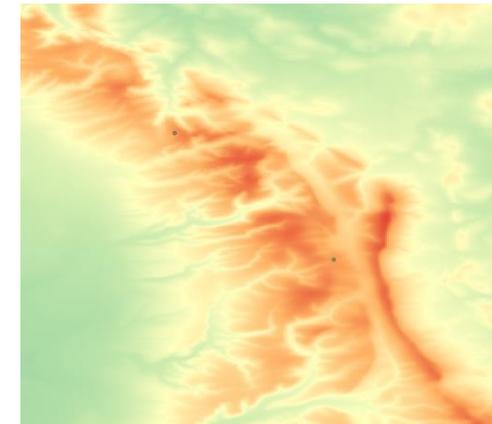
Mittelwert 6,33

Umfrage im FA WP zur Komplexitätseinschätzung

- Bewertung von 30 (!) Standortpaaren (Winddatenbasis und Neuplanung)
- Bewertung von orographischer Komplexität und Ähnlichkeit sowie Repräsentativität
- Abfrage gelbe und rote Linien für die jeweilige Situation
- Abfrage Unsicherheitsaufschlag bei Erreichen der roten Linie

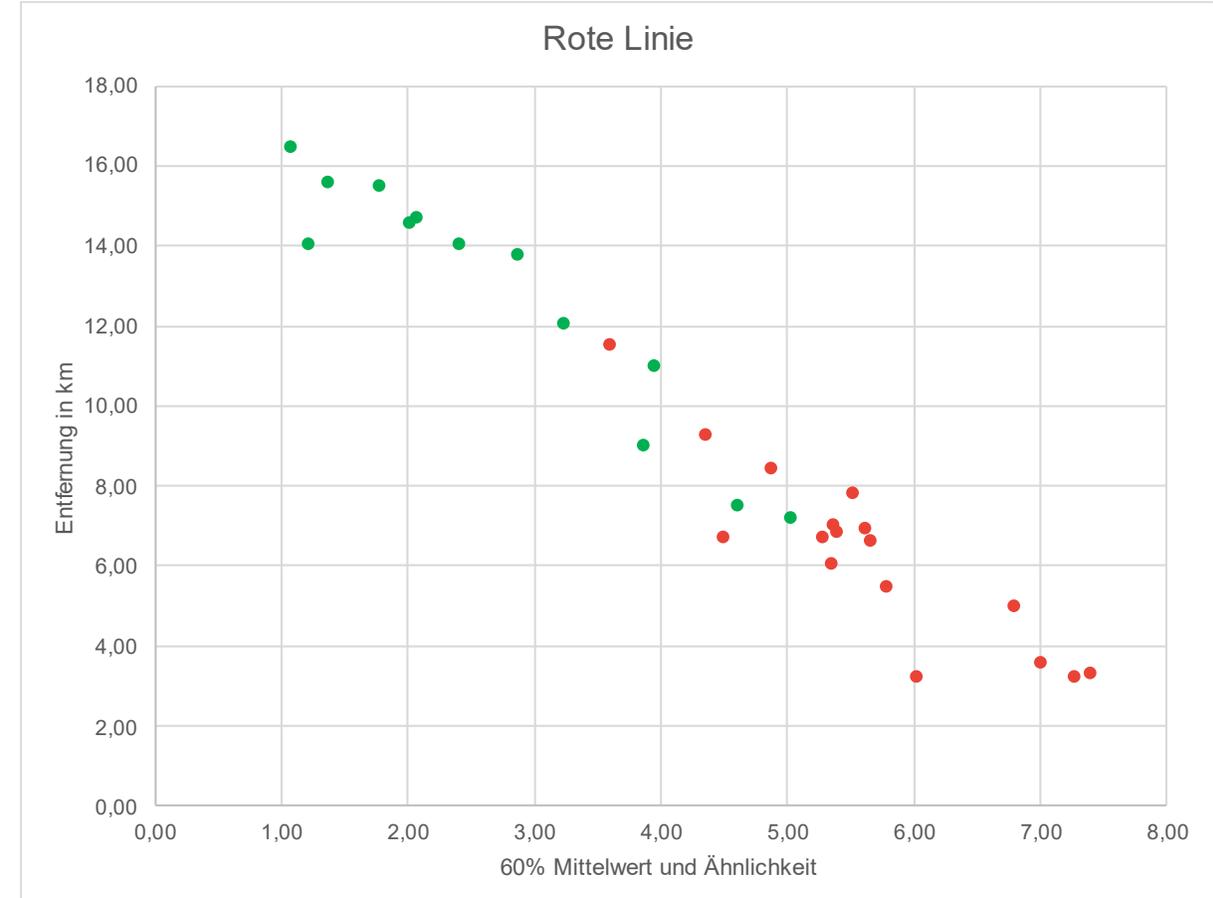
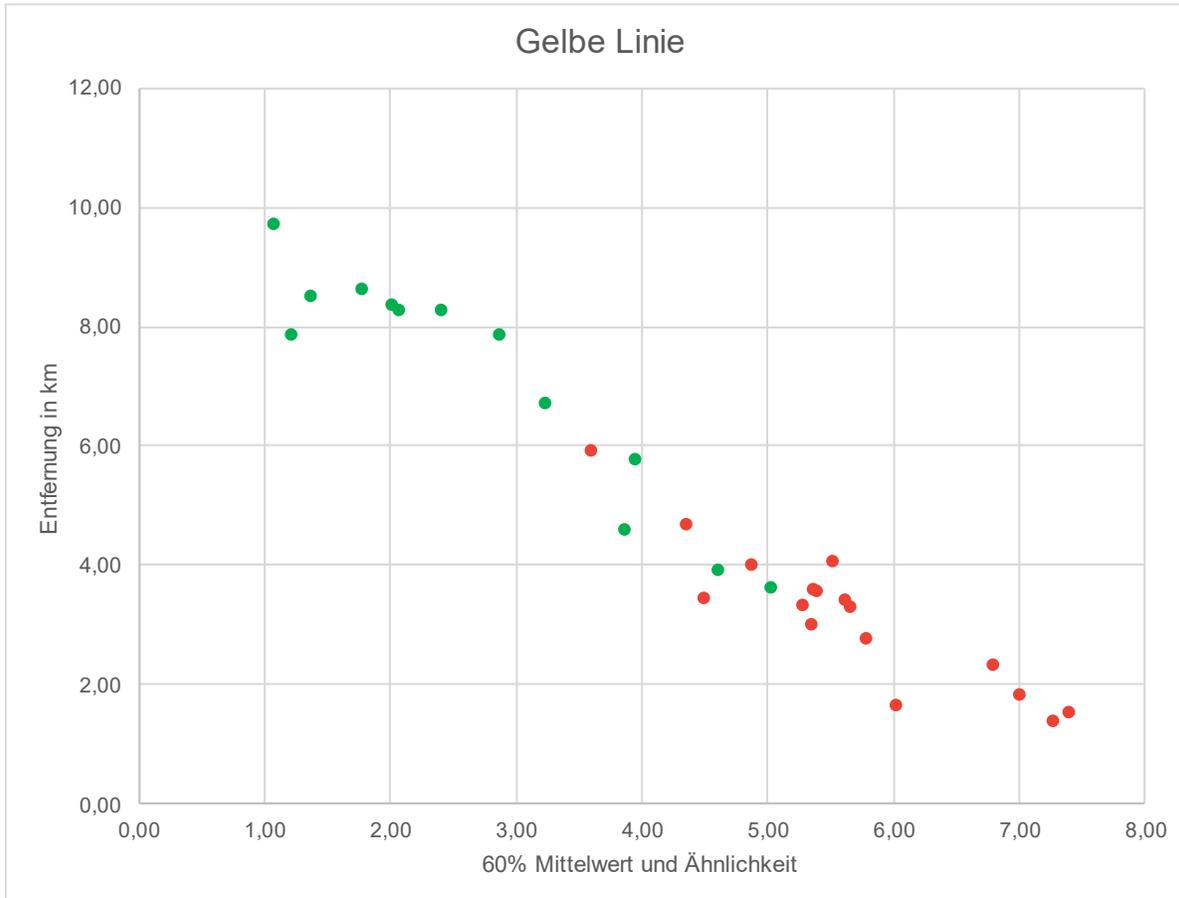


Umfrage: Standort 12



Umfrage: Standort 29

Zusammenhang Bewertung Orographie – gelbe und rote Linie (rot=komplex nach IEC Ed. 3)





Ziele (entsprechend Vor-Umfrage (Kriterienkatalog) und Umfrageergebnissen (30 Standorte):

- Identifizierung eines Komplexitätsmaß mit möglichst guter Übereinstimmung zwischen Einschätzungen aus Umfrage (Komplexität und Ähnlichkeit) und dem Kriterium (=Benchmark zur Beurteilung eines Kriteriums)
- Grundsätzlich: Bewertung von Geländehöhenvariation und/oder Geländesteigungen
- Anwendung mit vertretbarem Aufwand
- Ggfls. bereits bekanntes Kriterium (nicht zwingend), ergebnisoffene Suche
- Umfrage ergab „Auftrag“, ein Kriterium zu finden, das auch die Ähnlichkeit bewertet
- Einfachheit: vorerst ohne Betrachtung der Windrichtungsverteilung (war in der Umfrage auch nicht gegeben)
- Reproduzierbarkeit: alle Kriterien mit der gleichen Geländedatenbasis berechnet



Untersuchte Kriterien für Komplexität und Ähnlichkeit

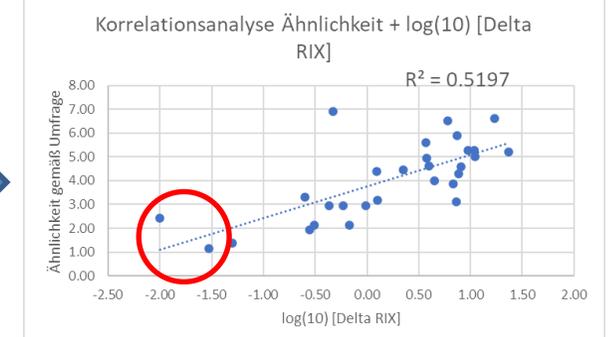
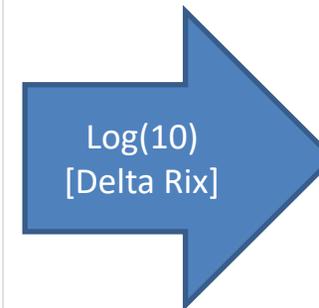
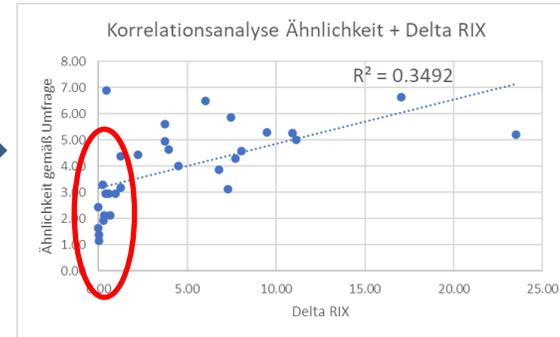
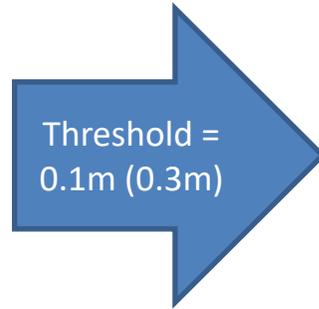
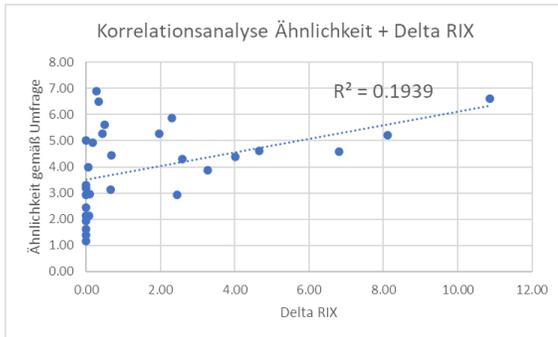
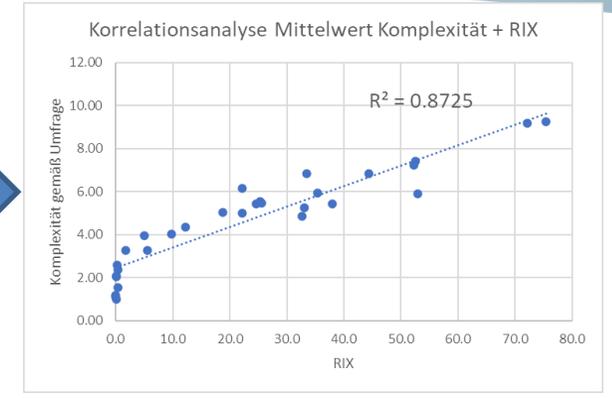
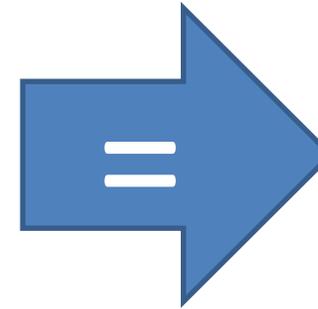
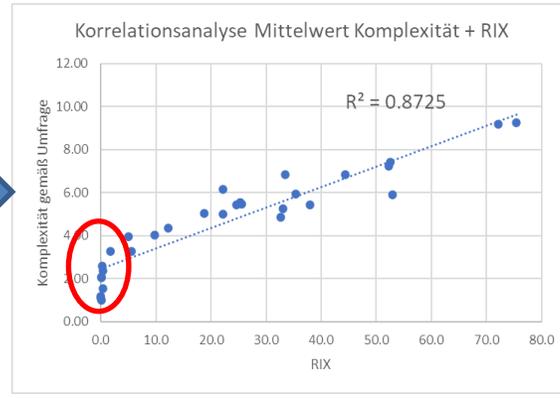
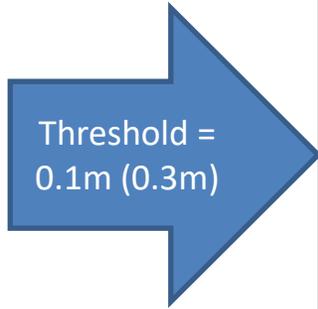
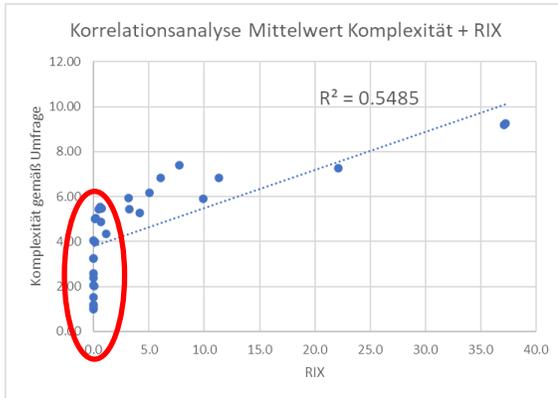
IEC 61400-12-1 Ed. 2	RIX + Delta RIX	Topographic Position Index
Multi Scale Topographic Position Index	Terrain Ruggedness Index	Terrain Standard Deviation
Wind Exposition Index	Wind Effect Index	IEC 61400-1 Ed. 3
IEC 61400-1 Ed. 4	Ähnlichkeit: Einfacher Geländehöhenunterschied	Ähnlichkeit: Windgeschwindigkeit gem. Windatlas

Herkunft der Kriterien, z.B.

- Turbine Design
- Power Curve Measurements
- GIS Indikatoren Geländecharakterisierung
- Berechnung von Windlasten (Gebäude)
- Anpassung Windmodell

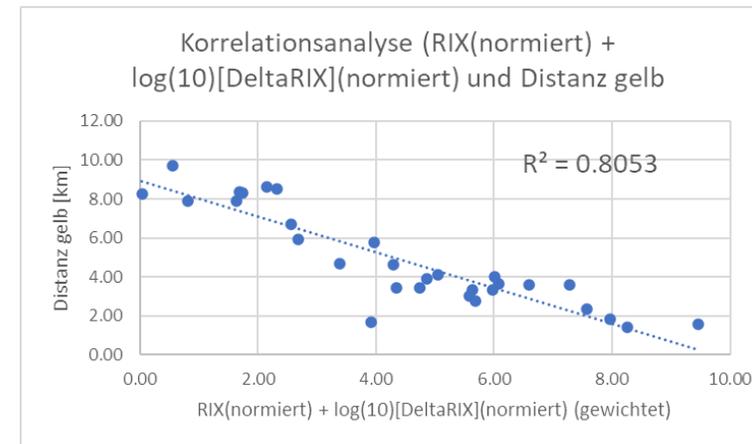
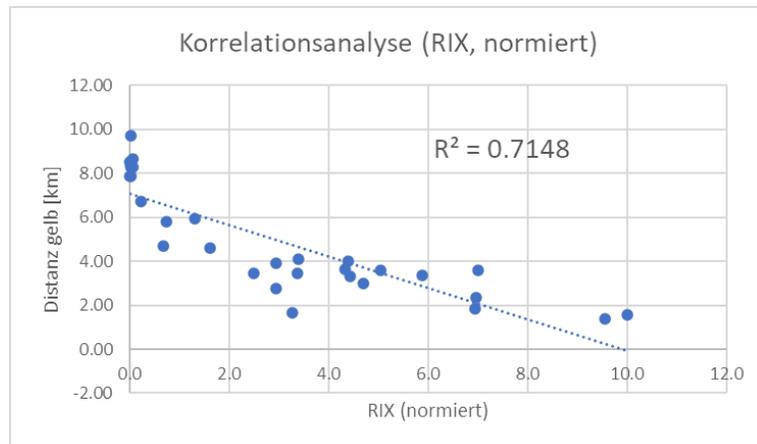
Anpassungsmöglichkeiten, z.B.

- Betrachtete Radien
- Schwellenwerte für Steigungen oder Geländevariation
- Delta oder Relation zwischen Standort A/B (Ähnlichkeit)
- Kombination von Zwischenergebnissen (Avg, Max, Min, etc)



Der RIX-Wert ist u.a. durch den Radius r der Betrachtungsfläche als auch durch den Schwellwerte (Threshold) th bezüglich der (maximalen) Steigung innerhalb eines definierten Sektors definiert.

- Objektives Kriterium für **Komplexität** und **Ähnlichkeit**, das den Einschätzungen aus der Umfrage nahe kommt
- **Hinzunahme von Ähnlichkeit verbessert Korrelation zu Roter/Gelber Linie** (bei Umfrageergebnissen und gefundenem Kriterium)





Vorschlag Arbeitsgruppe: Angepasster RIX für Komplexität und Ähnlichkeit

- Ein Kriterium für Komplexität und Ähnlichkeit
- Tool zur Berechnung vorhanden und bekannt (WAsP Map Editor)
- Einfache Berechnung
- Weitere Optimierung möglich (Schwellenwert Steigung, Radien)

Entscheidung des FA WP über weiteres Vorgehen

- Verfeinerung und Ausarbeitung des vorgestellten Repräsentativitätsmaßes auf Basis des RIX / Delta RIX
- Berücksichtigung der Ähnlichkeit innerhalb des Repräsentativitätsmaßes
- Erarbeitung eines linearen Kriteriums statt einer Klassenbildung

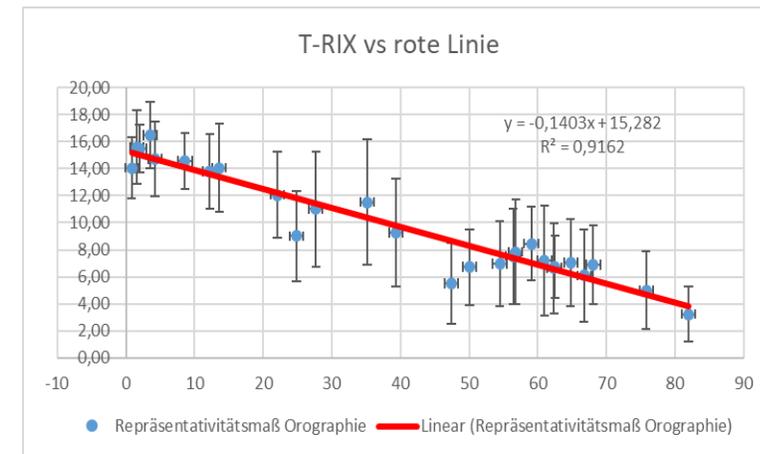
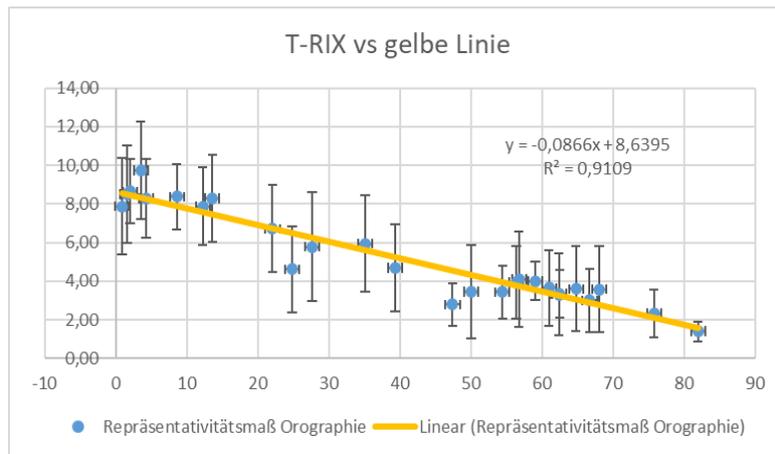


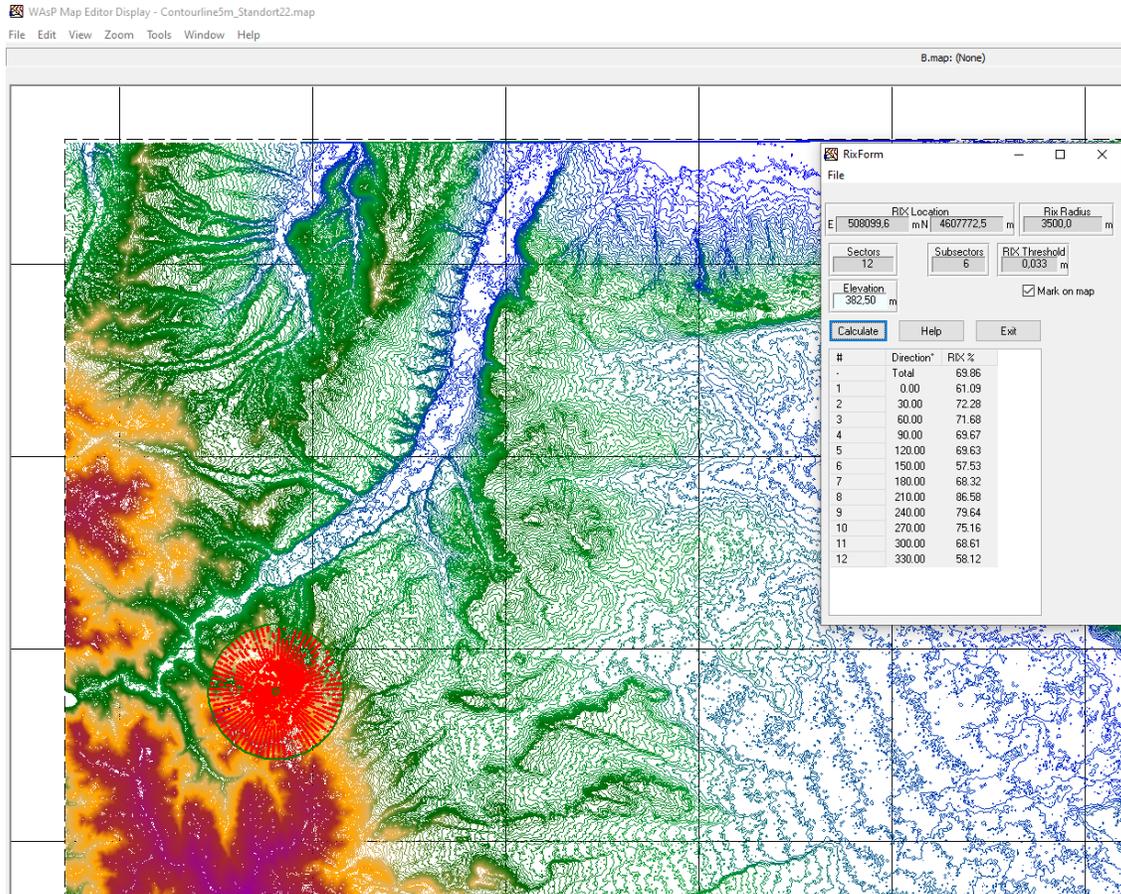
- Der maßgebliche Parameter zur Bewertung der daraus folgenden Ergebnisse ist das Bestimmtheitsmaß R^2 zwischen den Daten der ursprünglichen Umfrage und den Ergebnissen des zu entwickelnden Repräsentativitätsmaßes.
- Um eine optimierte Relation zu den Umfragewerten zu erreichen, wurden die zwei Parameter r und th des RIX mehrfach variiert
- Von den verschiedenen Variationen der betrachteten Komplexitätsindikatoren zeigten die RIX-Berechnungen mit einem Radius $r = 3500$ m und einem Schwellenwert von $th = 0,033$ die beste Korrelation in Bezug auf die absolute orografische Komplexität mit den Erhebungsergebnissen.
- Von den verschiedenen Variationen der betrachteten Ähnlichkeitsindikatoren zeigte final der einfache Höhenunterschied $|\Delta h|$ die beste Korrelation mit den Ergebnissen der Umfrage.



- Aus den oben genannten Schritten erfolgte eine korrelationsoptimierte Gewichtung der Komplexität (RIX) und der absoluten Geländehöhendifferenz $|\Delta h|$ mit folgendem Ergebnis:

$$\text{Repräsentativitätsmaß T-RIX} = 0.9 * \text{Mittelwert(RIX)} + 0.1 * |\Delta h|$$
- Mit diesem Repräsentativitätsmaß werden Bestimmtheitsmaße R^2 von über 0,91 sowohl für die gewünschte gelbe als auch rote Linie erreicht.





In der Revision 12 der TR6 werden die folgenden Anforderungen an die Berechnung definiert:

- Die Berechnung erfolgt anhand von Isolinien.
- Die horizontale Auflösung des zugrundeliegenden Höhendatensatzes muss mindestens 50 m betragen.
- Die Isolinien müssen eine vertikale Auflösung von mindestens 5 m aufweisen.
- Radius r des betrachteten Umkreises: 3500 Meter
- Schwellenwert für die maximale Steigung: 0,033 m/m
- Anzahl der Sektoren: 12
- Anzahl der Teilsektoren: 6
- Für jeden Standort wird der durchschnittliche RIX in Prozent über die Richtungssektoren gebildet, dann wird für jedes Standortpaar (Winddatenbasis, Neuplanung) der mittlere RIX berechnet.



- Auf der Grundlage des T-RIX werden anhand der aus den Umfrageergebnissen abgeleiteten empirischen Formeln die Grenzen der Übertragbarkeit von Windbedingungen mit Hilfe von Strömungsmodellen definiert .

$$A = \max(-0.087 \cdot T-RIX + 8.5; 1.5)$$

$$B = \max(-0.140 \cdot T-RIX + 15.0; 3.0)$$

- Abstand A definiert die von der Komplexität und des Geländehöhenunterschieds beeinflusste Entfernung, innerhalb derer die Windverhältnisse mit Hilfe von Strömungsmodellen übertragen werden können.
- Abstand B definiert die durch den T-RIX beeinflusste Entfernung, innerhalb derer die Windverhältnisse mit Hilfe von Strömungsmodellen nur unter Anwendung von Zusatzunsicherheiten übertragen werden können.
- Wird die Grenze B überschritten, ist die Bearbeitung eines TR6 Rev. 12-konformen Wind- und Energieertragsgutachtens mit den vorhandenen Referenzdaten nicht möglich und es muss beispielsweise eine Windmessung durchgeführt werden.

T-RIX	A	B
0	8,5	15,0
5	8,1	14,3
10	7,6	13,6
15	7,2	12,9
20	6,8	12,2
25	6,3	11,5
30	5,9	10,8
35	5,5	10,1
40	5,0	9,4
45	4,6	8,7
50	4,2	8,0
55	3,7	7,3
60	3,3	6,6
65	2,8	5,9
70	2,4	5,2
75	2,0	4,5
80	1,5	3,8
85	1,5	3,1
90	1,5	3,0
95	1,5	3,0
100	1,5	3,0



- In Zukunft (Verabschiedung TR6 Rev. 12 Ende November 2023) bestimmt sowohl die Ähnlichkeit als auch die Komplexität der Standorte die Grenzen der Übertragbarkeit.
- Es gibt nicht mehr wie bisher eine feste Obergrenze für die Übertragbarkeit von Daten eines Messmastes oder einer bestehenden Windenergieanlage aufgrund ihrer orographischen Eigenschaften, sondern die Grenze wird individuell für ein bestimmtes Paar aus Datenquelle und geplantem Anlagenstandort berechnet.
- Aufgrund der deutlich größeren Variation und des Erstellungsprozesses des T-RIX wird davon ausgegangen, dass die objektive Beurteilung der Grenzen der Übertragung von Referenzdaten durch ein Windmodell den vorhandenen Geländeeigenschaften und der Einschätzung des Windgutachters wesentlich besser entspricht als bisher.
- Erste Erfahrungen lassen tendenziell darauf schließen, dass unter Anwendung der neuen Vorgaben eine größere Anzahl als bisher an Windenergieprojekten in Deutschland ohne die Durchführung einer Windmessung realisiert werden kann, allerdings unter Inkaufnahme von Zusatzunsicherheiten.
- Weitere Informationen: siehe Veröffentlichung auf Zenodo

Vielen Dank für Ihr Interesse!

**FGW e.V. Fördergesellschaft Windenergie
und andere Dezentrale Energien**

Oranienburger Straße 45
10117 Berlin

Fon: +49 30 3010 1505 - 0
Fax: +49 30 3010 1505 - 1

E-Mail: klose@wind-fgw.de
Internet: www.wind-fgw.de

