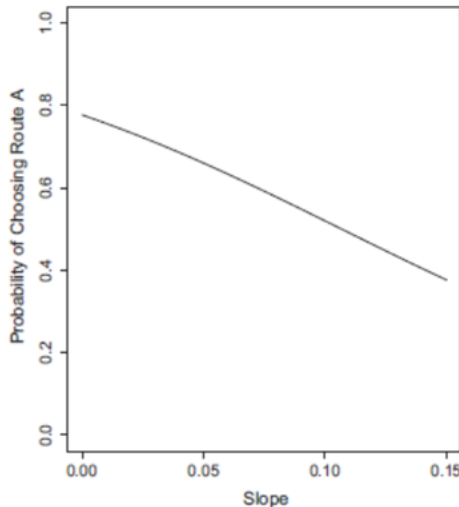
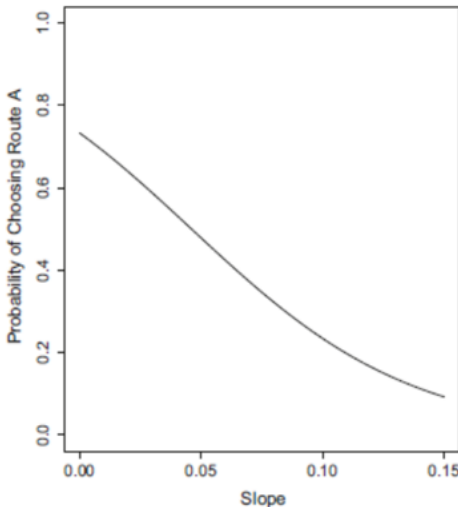


Im Rahmen eines Workshops wurden die verschiedenen Parameter vorgestellt und diskutiert. Darauf aufbauend wurde mit den Teilnehmenden diskutiert welche Parameter im Rahmen eines Use Case vertieft untersucht werden sollten, um ihre Abbildung in Verkehrsmodellen weiterzuentwickeln. Der Austausch ergab, dass eine tiefere Betrachtung des Einflussfaktors Topografie für die Projektpartner von höchstem Interesse ist. Daher konzentrierte sich der Use Case auf die Betrachtung der Parameter des Einflussfaktors Topografie/Höhenunterschiede/Längsneigung.

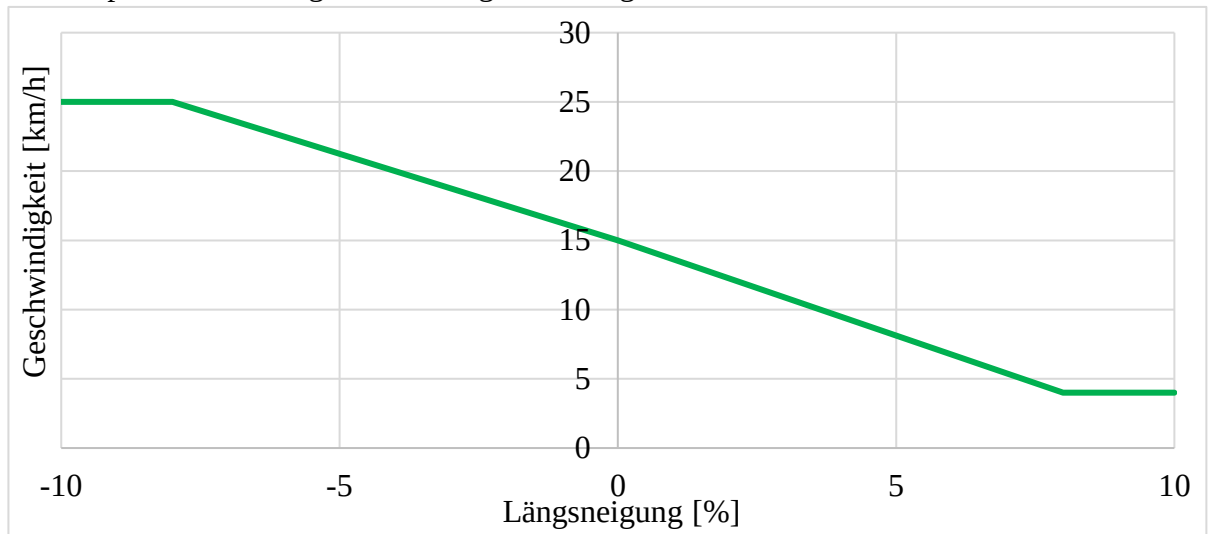
Im Rahmen der Literaturrecherche wurde die Qualität und Quantität dieses Einflussfaktors in mehrere Publikationen nachgewiesen. Daher wurden für den Use Case zuerst die Publikationen zusammengetragen, die ein empirisches Ergebnis enthalten, aus welchem sich Parameter für das Verkehrsmodell ableiten lassen. Es wurden sechs Publikationen identifiziert. Diese sind in Tabelle 1 mit den wesentlichen Erkenntnissen dargestellt.

Tabelle 1: Literaturquellen für den Use Case

Quelle	Erkenntnis
Menghini et al. (2010)	Ein Anstieg der maximalen Steigung um 1 % wird wie eine Verlängerung der Distanz um 115 m empfunden
Prato et al. (2018)	Faktoren zur Berechnung der empfundenen Länge aus der Längsneigung
Broach et al. (2012)	Faktoren zur Berechnung der empfundenen Länge aus der Längsneigung
Motoaki et al. (2015)	Wahlwahrscheinlichkeit einer Route in Abhängigkeit ihrer Steigung differenziert nach zwei Klassen der Radfahrenden. Route A: 20 min, niedriges Verkehrsaufkommen und Steigung von X % Route A: 10 min, hohes Verkehrsaufkommen und Steigung von 10 % Class 1  Class 2  Fig. 5. Choice probability of choosing route A as a function of slope.
Hood et al. (2011)	Der durchschnittliche Radfahrer vermeidet es, einen 10 m hohen Hügel zu befahren, solange der Umweg weniger als 0,59 km beträgt.
Huber (2022)	Bei zwei gleichen Routen mit Wahlwahrscheinlichkeit je 50 % bewirkt der Anstieg des Anteils von Streckenabschnitten mit einer Längsneigung > 2 % um 10 % eine Verringerung der Wahlwahrscheinlichkeit um 2,7 %.

Das Routenwahlverhalten, welches durch diese Parameter beschrieben wird, soll in den Verkehrsmodellen abgebildet bzw. reproduziert werden. Dafür sind die dargelegten Parameter in die Widerstandsparameter, die in Verkehrsmodellen verwendet werden, zu übersetzen. Für die Abbildung der Topografie und deren Einfluss auf den Radverkehr wurden drei Ansätze verfolgt:

1. Berechnung einer der Streckengeschwindigkeit aus der Längsneigung mit einer stetigen Funktion: Die Streckengeschwindigkeit des Radverkehrs wird aus einer Grundgeschwindigkeit in der Ebene und der Längsneigung der Strecke berechnet. Dabei wird eine stetige Funktion angewandt. Ihre Formel und der Verlauf für eine Standardparametrisierung sind im Folgenden dargestellt.



Wenn ($LN < LN_{Min}$; V_{Max} ;

Wenn ($LN > LN_{Max}$; V_{Min} ;

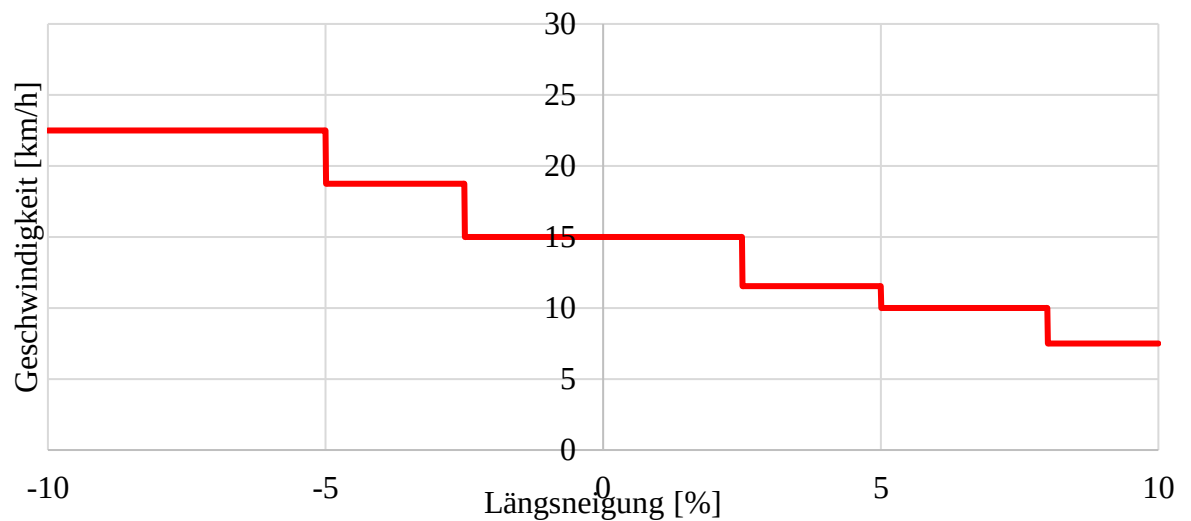
Wenn ($LN < 0$; $V_E + LN \cdot ((V_{Max} - V_E) / LN_{Min})$;

$V_E - LN \cdot ((V_E - V_{Min}) / LN_{Max}))$)

Parameter	Erklärung	Standardwert
LN	Längsneigung [%]	
V_E	Grundgeschwindigkeit in der Ebene	15 km/h
V_{Min}	Minimale Geschwindigkeit	4 km/h
V_{Max}	Maximale Geschwindigkeit	25 km/h
LN_{Min}	Längsneigung bei der die maximale Geschwindigkeit erreicht wird	- 8 %
LN_{Max}	Längsneigung bei der die minimale Geschwindigkeit erreicht wird	+ 8 %

Mit dieser Formel wird für jede Strecke eine Geschwindigkeit berechnet. Aus dieser wird die Fahrzeit des Radverkehrs auf der Strecke abgeleitet. Die Summe der Fahrzeiten aller Strecken einer Route bildet gemeinsam mit den Abbiegezeiten die Reisezeit bzw. den Widerstand der Route.

2. Berechnung einer Streckengeschwindigkeit aus der Längsneigung mit einer stufigen Funktion: Die Streckengeschwindigkeit des Radverkehrs wird aus einer Grundgeschwindigkeit in der Ebene und der Längsneigung der Strecke berechnet. Dabei wird eine stufige Funktion angewandt. Die Längsneigung wird dazu in Klassen (z. B. -2,5 % bis +2,5 %, +2,5 % bis 5,0 % ...) eingeteilt. Innerhalb einer Klasse ist die Geschwindigkeit konstant. Zwischen den Klassen unterscheidet sie sich. Die Formel und der Verlauf der Funktion sind eine Standardparametrisierung im Folgenden dargestellt.



Wenn ($LN < LN_1$; $f_1 \cdot V_E$;

Wenn ($LN < LN_2$; $f_2 \cdot V_E$;

Wenn ($LN < LN_3$; $f_3 \cdot V_E$;

Wenn ($LN < LN_4$; $f_4 \cdot V_E$;

Wenn ($LN < LN_5$; $f_5 \cdot V_E$;

$f_6 \cdot V_E$))))

Parameter	Erklärung	Standardwert
LN	Längsneigung [%]	
V_E	Grundgeschwindigkeit in der Ebene	15 km/h
f_1	Anpassungsfaktor der Stufe 1	1,25
f_2	Anpassungsfaktor der Stufe 2	1,25
f_3	Anpassungsfaktor der Stufe 3	1,00
f_4	Anpassungsfaktor der Stufe 4	0,77
f_5	Anpassungsfaktor der Stufe 5	0,67
f_6	Anpassungsfaktor der Stufe 6	0,50
LN_1	Grenze zwischen Stufe 1 und Stufe 2	- 5,0 %
LN_2	Grenze zwischen Stufe 2 und Stufe 3	- 2,5 %
LN_3	Grenze zwischen Stufe 3 und Stufe 4	+ 2,5 %
LN_4	Grenze zwischen Stufe 4 und Stufe 5	+ 5,0 %
LN_5	Grenze zwischen Stufe 5 und Stufe 6	+ 8,0 %

Es können beliebig viele Stufen definiert werden. So kann die Funktion an die verschiedensten Anforderungen angepasst werden. Sie ist dementsprechend zu erweitern. Die Zahl der zu definierenden Parameter hängt von der Anzahl der Klassen ab. Im Rahmen der betrachteten Anwendungsfälle dieser Funktion wurden sechs Stufen definiert. Daraus ergeben sich zwölf Parameter. Mit der vorgestellten Formel wird für jede Strecke eine Geschwindigkeit berechnet. Aus dieser wird die Fahrzeit des Radverkehrs auf der Strecke abgeleitet. Die Summe der Fahrzeiten aller Strecken einer

Route bildet gemeinsam mit den Abbiegezeiten die Reisezeit bzw. den Widerstand der Route.

- Integration der maximalen Steigung in den Routenwiderstand: Bei diesem Verfahren wird die Längsneigung nicht in den Widerstand der Strecken integriert. Dafür wird bei der Modellierung der Routenwahl für jede Route die maximale Steigung aller ihrer Strecken bestimmt. Daraus wird ein Zusatzwiderstand berechnet und zum Widerstand der Route, welcher sich aus den Strecken und den Abbiegern zusammensetzt, addiert. Die Formel ist im Folgenden dargestellt

$$\text{Routenwiderstand} = \sum \text{Widerstand Strecken} + \sum \text{Widerstand Abbieger} + \beta \cdot \text{LN}_{\text{Max}}$$

Parameter	Erklärung	Standardwert
LN_{Max}	Maximale Längsneigung/Steigung [%] aller Strecken der Route	
β	Parameter zur Steuerung des Einflusses der maximalen Steigung	0,5

Dieses Verfahren verfügt über einen Parameter β .

Die Parameter der in Tabelle 1 dargelegten Erkenntnisse sind in die Parameter der drei Ansätze zu übersetzen. Dies wurde im Rahmen des Use Case für jede Kombination aus Literaturerkenntnis und Ansatz zur Abbildung im Modell durchgeführt. Dazu wurde ein Excel-Tool entwickelt. In diesem sind die Ansätze zur Berechnung des Widerstands der Strecken und Routen sowie die darauf aufbauende Verkehrsstromaufteilung für eine Menge von Routenpaaren implementiert. Als Routenwahlmodell wurde jeweils ein Logitmodell mit einem Wahlparameter von -0.25 für die Methode 1 und 2 sowie einem Wahlparameter von -0.1 für die Methode 3 verwendet.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse dargelegt.

Tabelle 2: Ergebnisse des Use Case

Quelle / Ansatz	Stetige Funktion	Stufige Funktion	Maximale Steigung
Menghini et al. (2010)	Es konnten konkrete Werte für die 4 Parameter bestimmt werden. Die Funktion ist demnach flacher einzustellen als in den Ausgangseinstellungen. Die geschätzten Parameter sind die Folgenden. $V_{\text{Min}} = 6,0 \text{ km/h}$ $V_{\text{Max}} = 18,0 \text{ km/h}$ $\text{LN}_{\text{Min}} = - 20, \%$ $\text{LN}_{\text{Max}} = + 8,5 \%$	Die hohe Zahl von Parameter erschwerte deren Schätzung. Die abgeschätzten Parameter legen eine flachere Einstellung der Funktion und eine breite Klasse von 8 % um 0 % Längsneigung nahe. Die geschätzten Parameter sind die Folgenden. $f_1 = 1,20$ $f_2 = 1,20$ $f_3 = 1,00$ $f_4 = 0,85$ $f_5 = 0,70$ $f_6 = 0,50$ $\text{LN}_1 = - 6,0 \%$	Es konnte ein konkreter Wert von 0,52 für β bestimmt werden.

		$LN_2 = - 4,0 \%$ $LN_3 = + 4,0 \%$ $LN_4 = + 5,0 \%$ $LN_5 = + 8,0 \%$	
Prato et al. (2018)	Die Schätzung ergab, dass im Bereich negativer Längsneigungen keine Erhöhung der Geschwindigkeit stattfinden sollte. Im Bereich positiver Längsneigungen ergab sich ein steilerer Verlauf als in den Ausgangseinstellungen. Die geschätzten Parameter für Steigungen sind die Folgenden. $V_{Min} = 2,9 \text{ km/h}$ $LN_{Max} = + 5,7 \%$	Durch die Übereinstimmung der Struktur der Widerstandsfunktion mit der Struktur der Ergebnisse der Studie konnten die Parameter für den Bereich positiver Längsneigungen einfach geschätzt werden. Da die Studie keine Aussagen zu negativen Längsneigungen enthält war für diesen Bereich keine Schätzung möglich. Für den Bereich positiver Längsneigungen legen die Ergebnisse eine Reduzierung der Faktoren f gegenüber den Standardwerten und somit eine Erhöhung der Widerstände nahe. Die geschätzten Parameter für Steigungen sind die Folgenden. $f_3 = 1,00$ $f_4 = 0,54$ $f_5 = 0,48$ $f_6 = 0,20$ $LN_3 = + 1,0 \%$ $LN_4 = + 3,5 \%$ $LN_5 = + 5,0 \%$	Es konnte ein konkreter Wert von 1,32 für β bestimmt werden
Broach et al. (2012)	Die Schätzung ergab, dass im Bereich negativer Längsneigungen keine Erhöhung der Geschwindigkeit stattfinden sollte. Im Bereich positiver Längsneigungen ergab sich ein steilerer Verlauf als in den Ausgangseinstellungen. Die geschätzten Parameter für Steigungen sind die Folgenden.	Durch die Übereinstimmung der Struktur der Widerstandsfunktion mit der Struktur der Ergebnisse der Studie konnten die Parameter für den Bereich positiver Längsneigungen einfach geschätzt werden. Da	Es konnte ein konkreter Wert von 1,09 für β bestimmt werden

	$V_{\text{Min}} = 1,6 \text{ km/h}$ $LN_{\text{Max}} = + 7,2 \%$	die Studie keine Aussagen zu negativen Längsneigungen enthält war für diesen Bereich keine Schätzung möglich. Für den Bereich positiver Längsneigungen legen die Ergebnisse eine Reduzierung der Faktoren f gegenüber den Standardwerten und somit eine Erhöhung der Widerstände nahe. Die geschätzten Parameter für Steigungen sind die Folgenden. $f_3 = 1,00$ $f_4 = 0,65$ $f_5 = 0,33$ $f_6 = 0,12$ $LN_3 = + 2,0 \%$ $LN_4 = + 4,0 \%$ $LN_5 = + 6,0 \%$	
Hood et al. (2011)	Es konnten konkrete Werte für die 4 Parameter bestimmt werden. Im Gefälle sollte keine Beschleunigung erfolgen. Bei Steigungen erreicht die Funktion eine minimale Geschwindigkeit im Bereich der Gehgeschwindigkeit. Diese wird allerdings bei einer niedrigeren Steigung erreicht, so dass die Funktion nun steiler verläuft. Die geschätzten Parameter für Steigungen sind die Folgenden. $V_{\text{Min}} = 5,2 \text{ km/h}$ $LN_{\text{Max}} = + 2,0 \%$	Die hohe Zahl von Parameter erschwerte deren Schätzung. Die abgeschätzten Parameter legen eine geringe Beschleunigung im Gefälle nahe, die mit zunehmendem Gefälle nicht weiter zunimmt, und eine schmale Klasse von 4 % um 0 % Längsneigung nahe. Die geschätzten Parameter sind die Folgenden. $f_1 = 1,20$ $f_2 = 1,20$ $f_3 = 1,00$ $f_4 = 0,80$ $f_5 = 0,60$ $f_6 = 0,50$ $LN_1 = - 6,0 \%$ $LN_2 = - 2,0 \%$ $LN_3 = + 2,0 \%$ $LN_4 = + 3,0 \%$ $LN_5 = + 5,0 \%$	Es konnte ein konkreter Wert von 1,03 für β bestimmt werden

Huber (2022)	Es konnten konkrete Werte für die 4 Parameter bestimmt werden. Im Gefälle sollte keine Beschleunigung erfolgen. Die geschätzten Parameter für Steigungen sind die Folgenden. $V_{\text{Min}} = 7,1 \text{ km/h}$ $LN_{\text{Max}} = + 18,3 \%$	Die hohe Zahl von Parameter erschwerte deren Schätzung. Die abgeschätzten Parameter legen eine geringe Beschleunigung im Gefälle nahe, die mit zunehmendem Gefälle nicht weiter zunimmt, und eine Klasse von 5 % um 0 % Längsneigung nahe. Die geschätzten Parameter sind die Folgenden. $f_1 = 1,25$ $f_2 = 1,25$ $f_3 = 1,00$ $f_4 = 0,77$ $f_5 = 0,67$ $f_6 = 0,52$ $LN_1 = - 5,0 \%$ $LN_2 = - 2,5 \%$ $LN_3 = + 2,5 \%$ $LN_4 = + 5,0 \%$ $LN_5 = + 8,0 \%$	Es konnte ein konkreter Wert von 0,52 für β bestimmt werden
Motoaki et al. (2015)	Das in der Studie dargelegte Routenwahlverhalten wurde versucht mit den Ansätzen der stetigen und der stufigen Geschwindigkeitsfunktion nachzubilden. Da die Belastung des Kfz-Verkehrs zu berücksichtigen ist wurde zu ihrer Integration in die Berechnung des Widerstands des Radverkehrs auf Erfahrungswerte zurückgegriffen. Es zeigt sich, dass es mit der stufen Widerstandsfunktion besser nachgebildet werden kann. Die Optimierung ergab, dass beide Funktionen für eine Minimierung der Abweichung steiler einzustellen sind als die Ausgangseinstellungen. Die Literaturquelle enthält keine Aussagen zu negativen Längsneigungen. Daher wurden nur positive Längsneigungen betrachtet. Die geschätzten Parameter sind die Folgenden. $V_{\text{Min}} = 3,8 \text{ km/h}$ $LN_{\text{Max}} = + 15,0 \%$	$f_2 = 1,00$ $f_3 = 1,37$ $f_4 = 1,83$ $f_5 = 2,40$ $f_6 = 2,81$ $LN_2 = + 1,3 \%$ $LN_3 = + 4,3 \%$ $LN_4 = + 7,9 \%$ $LN_5 = + 13,6 \%$	

Im Rahmen des Excel-Tools wurde für die Übersetzung der Parameter eine Menge von Routenpaaren definiert. Diese sind eine Grundlage der Übersetzung und haben einen Einfluss auf das Ergebnis. Die Qualität der Setzung der Eigenschaften der Routenpaare bzw. der Routenpaare

selbst ist somit ein Einflussfaktor auf die Ergebnisse des Use Case. Die resultierenden Parameter sind unter Berücksichtigung dieser Tatsache zu benutzen.

Die Übersetzung der Parameter gestaltete sich für den dritten Ansatz „maximale Steigung“ am einfachsten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass er nur über einen Parameter verfügt. Die Möglichkeit eines unterbestimmten Gleichungssystems bei der Bestimmung der Parameter besteht somit nicht. Diese Widerstandsfunktion ist daher vergleichsweise einfach zu parametrisieren. Der Nachteil der einfachen Parametrisierung liegt in den begrenzten Möglichkeiten zur Anpassung im Rahmen der Kalibrierung. Zudem ist die Repräsentativität der maximalen Steigung, die unabhängig von ihrem Anteil an der Route betrachtet wird, für die gesamte Route beschränkt. Für die beiden Längsneigung-Geschwindigkeit-Funktionen ist das Gegenteil der Fall. Da sie über eine höhere Zahl von Parametern verfügen gestaltet sich ihre Parametrisierung herausfordernder und es wird die Längsneigung jeder Strecke berücksichtigt. Diese Funktionen bieten mehr Spielraum für Feinanpassungen. Für die Kalibrierung von Verkehrsmodellen ist dies ein Vorteil. Die stufige Funktion bietet mehr Möglichkeiten als die Stetige, da die Zahl der Stufen frei gewählt werden kann. So kann auf verschiedene Besonderheiten eingegangen werden und die Funktion kann nach den jeweiligen Bedürfnissen angepasst werden. Bei der stetigen Funktion können die Geschwindigkeiten zwischen der minimalen und der maximalen Steigung sowie der Ebene nur über die vier genannten Parameter gesteuert werden. Zudem führt die Klasse um 0 % Längsneigung mit einem Faktor von 1 zu symmetrischen Widerständen im Bereich um 0 % Längsneigung. Die stetige Funktion berechnet asymmetrische Widerstände. So werden Asymmetrien in den Modellergebnissen reduziert und Wahrnehmungsschwellen der am Verkehr teilnehmenden im Modell abgebildet.

Literaturverzeichnis

Broach, J., Dill, J., & Gliebe, J. (2012). Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data. *Transportation Research Part a: Policy and Practice*, 46(10), 1730–1740. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.07.005>

Hood, J., Sall, E., & Charlton, B. (2011). A GPS-based bicycle route choice model for San Francisco, California. *Transportation Letters*, 3(1), 63–75.
<https://doi.org/10.3328/TL.2011.03.01.63-75>

Huber, S. (2022). Analyse des Routenwahlverhaltens von Radfahrenden auf Grundlage GPS-basierter Daten zum real beobachteten Verkehrsverhalten,
<https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A79035/attachment/ATT-0/>

Menghini, G., Carrasco, N., Schüssler, N., & Axhausen, K. W. (2010). Route choice of cyclists in Zurich. *Transportation Research Part a: Policy and Practice*, 44(9), 754–765.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.07.008>

Motoaki, Y., Daziano, R., (2015). A hybrid-choice latent-class model for the analysis of the effects of weather on cycling demand, *Transportation Research Part A* 75 (2015) 217–230
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965856415000592>

Prato, C. G., Halldórsdóttir, K., & Nielsen, O. A. (2018). Evaluation of land-use and transport network effects on cyclists' route choices in the Copenhagen Region in value-of-distance space. *International Journal of Sustainable Transportation*, 12(10), 770–781.
<https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1437236>