

Modellierung Risiko Indikator

Wohnen unter Druck in Deutschland im Klimawandel

Abschlussprojekt DSI-Weiterbildung, 05.09.2025

Wohnen in Deutschland ist sowohl durch ökonomische Einflüsse als auch durch klimatische Änderungen unter Druck geraten. Extremwetterlagen häufen sich.

Um einen qualitativen Eindruck der Situation zu bekommen, modellieren wir einen Risiko-Index (RI), der verschiedene Faktoren berücksichtigt. Wir charakterisieren das Risiko aus zwei Haupteinflüssen

- Klima-Exposition (KEI)
- Vulnerabilität des Wohnens (VUL)

und definieren das Risiko als Produkt

$$RI = KEI \cdot VUL$$

Achtung: KEI und VUL werden vor Multiplikation auf die gleiche Skala renormalisiert, um sie vergleichbar zu machen.

Werte aus Datenbanken und Wetterrastern resp. Statistiken werden z-transformiert und gewichtet summiert. Der multiplikative Ansatz ermöglicht sowohl Arbeitsteilung als auch klare Trennung der beiden Einflüsse in der Modellierung.

Klarerweise ist unser Ansatz unvollständig und gelenkt von den verfügbaren Daten. Eine ausführliche Diskussion über Einflüsse finden man in der Literatur.¹

¹<https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>

Zur Klärung unseres Ansatzes

Hazard (**H**) = **KEI**

Physische Klimatreiber (Hitze, Starkregen, Wind, Dürre)

Exposure (**E**)

Elemente im Gefährdungsraum (Bevölkerungsdichte, Siedlungs- und Verkehrsflächen)

Vulnerabilität (**V**)

Anfälligkeit, geringe Resilienz

- 65+ (medizinisch, physiologisch)
- niedriges Einkommen (geringe Anpassungs- resp Bewältigungsfähigkeit)
- Altbauanteil (Fragilität der Bausubstanz, thermische Ineffizienz)

Allgemeine Risikomodellierung:

$$R = H \times g(E, V)$$

wobei g eine Aggregationsfunktion ist. Im einfachsten Fall

$$g(E, V) = \alpha E + \beta V$$

wenn z.B. Taylor im 2dim betrachtet wird, d.h. nur den linearen Teil betrachtet.

In unserem Szenario ist die Aufteilung zu Kommunikationszwecken in bauliche und soziale Einflussfaktoren aufgeteilt.

Klima-Expositions-Index (KEI)

Wir betrachten

- Windexposition (**WEI**),
- Starkregen (**SI**),
- Hitze-Exposition (**HEI**),
- Dürre-Index nach de Martonne (**DMI**)

jeweils gemittelt auf Gemeinde Ebene.

Überflutungsgefahr durch Hochwasser ist in der Modellierung nicht berücksichtigt, da die Daten dazu bei den Bundesländern sehr unterschiedlich gehandhabt werden und in vielen verschiedenen Dateiformaten vorliegen.

Modellierung:

$$SWS = (0.5 \cdot (z(WEI)^+)^p + 0.5 \cdot (z(SI)^+)^p)^{1/p}$$
$$KEI = 0.4 \cdot SWS + 0.35 \cdot z(HEI)^+ + 0.25 \cdot z(DMI)^+$$

SWS = Starkregen-Wind Score. Beide Größen treten selten zusammen auf (stark negativ korreliert), daher in Lp Norm zusammengefasst (für p unendlich ist es die Maximunsnorm). In der Modellierung ist p=6, für glattere Übergänge

Wir geben im Folgenden einen Überblick über die Definition der Indikatoren und deren Quellen.

Windexposition (**WEI**)

WEI liegt als monatlich gemittelte Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe als Rasterdaten vor und wird über 3 Jahre gemittelt, um saisonale und extreme Ereignisse zu glätten. Windböen wurden nicht berücksichtigt.

Die Daten stammen von Copernicus² aus dem Datensatz ERA5:

1 of 1 request

Delete selected

Product	Submission	End	Status	Actions	
ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present Details	2025-08-25 12:13:44pm	2025-08-25 12:14:20pm	Complete 00:00:35	Download Expired	<input type="checkbox"/>

Your request

Request ID	eab33070-d6b9-44d8-b64a-e47296ab0dcf Open request form
__part_of_request_under_embargo	25490800012796777177320061659046338592
Product type	Monthly averaged reanalysis
Variable	10m wind speed
Year	2009, 2010, 2011, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025
Month	January, February, March, April, May, June, July, August, September, October, November, December
Time	00:00
Geographical area	North: 55°, West: 5°, South: 47°, East: 16°
Data format	NetCDF4 (Experimental)
Download format	Zip

² <https://cds.climate.copernicus.eu/>

Starkregen-Index (SI)

Der Starkregenindex besteht aus zwei Faktoren:

- Regenspende (**RN**) (1h, 10a)
- Niederschlagshöhe (**HN**) (24 h, 20a)

Die Regenspende beschreibt die Intensität eines 60min-Regens, der pro Jahr mit 10% Wahrscheinlichkeit über dem Mittel liegt. Es kann als *Spitzenintensität* angesehen werden. Die Niederschlagshöhe beschreibt die Menge an Regen in einem 24h Zeitraum, der mit 5% Wahrscheinlichkeit über dem jährlichen Mittel liegt. Man kann es als *Volumen eines Regenereignisses* auffassen.

Kombiniert ergibt sich ein Feature für Starkregen:

$$SI = 0,6 \cdot z(RN) + 0,4 \cdot z(HN)$$

Die Daten stammen aus dem KOSTRA-Datensatz³ des Deutschen Wetterdienses (DWD).

- Rn_KOSTRA-DWD-2020_D00060_T010.asc
- Hn_KOSTRA-DWD-2020_D01440_T020.asc

Der Datensatz bezieht sich auf stündliche Daten von 1951-2020 und gibt damit sehr zuverlässige Informationen über Langzeitverhalten von Starkniederschlagsereignissen.

Der DWD schreibt dazu auf der Homepage:

„Ein wesentlicher Anwendungsbereich für die rasterbasierte Starkniederschlagsauswertung ist die Dimensionierung wasserwirtschaftlicher Bauwerke. Dazu gehören z. B. Kanalnetze, Kläranlagen, Pumpwerke und Rückhaltebecken. Auch für die Dimensionierung von Entwässerungssystemen und Versickerungsanlagen werden sie häufig herangezogen. Mithilfe von KOSTRA-DWD ist es jedoch auch möglich, die Niederschlagshöhe starker Regenereignisse bezüglich ihrer Jährlichkeit einzuschätzen. Diese Einschätzung dient häufig der Bewertung von Schadensereignissen.“ (Stand 2025/09/03 12:04)

³ https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html

Hitze-Exposition (**HEI**)

Die Exposition durch Hitze setzt sich aus zwei Faktoren zusammen:

- Hitzeintrag (**I30**) von Tagestemperaturmaxima über 30°C
- Anzahl Tage über 35°C (**H35**) pro Jahr

I30 ist eine gewichtete Summe über die Sommertage eines Jahrs Y

$$I30_Y = \sum_{d \in Y} \max(0, T_{max} - 30^\circ C)$$

Eine Tagshöchsttemperatur von 40°C geht in diese Summe mit 10°C ein. Gemittelt wird über die fünf Jahre 2019-2023, um Schwankungen und Extreme zu glätten. Der Index stellt somit eine Langzeithitzebelastung dar.

H35 fängt Hitzespitzen ab.

Nicht betrachtet wurden die Anzahl Tropennächte (Tagesminimum über 20°C), sowie Hitzewellen (Anzahl Ereignisse mit mindestens 3 aufeinanderfolgenden Hitzetagen). Solche Ereignisse werden in der Hitzewarnung des DWD betrachtet.⁴

Der **HEI** ist wieder ein gewichtete Summe der Einflußfaktoren:

$$HEI = 0.6 \cdot z(I30) + 0.4 \cdot z(H35)$$

Die Daten⁵ stammen aus dem HYRAS-Projekt des DWD.⁶ Betrachtet wurde der Zeitraum von 2000-2024.

⁴ https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/uv_hitze_warnungen.html

⁵

https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/hyras_de/air_temperature_max/

⁶ <https://www.dwd.de/DE/leistungen/hyras/hyras.html>

De Martonne Dürre-Index (DMI)

Der Index beschreibt die Trockenheit eines Gebietes. Die Formel ist

$$DMI = \frac{P}{T + 10^{\circ}C}$$

wobei P der jährliche Niederschlag in mm und T die Jahresmitteltemperatur ist.
Der Wert wird benutzt um Eigenschaften von Klimazonen zu beschreiben:

DMI < 10: arid
DMI 10-20: semi-arid
DMI 20-28: mediterran
DMI 28-35: humid
DMI 35-55: sehr humid

Dabei gilt ein DMI von 5-10 als Hinweis für Wüstenklima, Werte zwischen 11-30 Steppenklima, und ab 35 Waldsteppenklima.

Das DWD stellt Daten zum Dürre-Index jährlich bzw saisonal bereit.⁷ Wir haben hier über 3 Jahre gemittelt (2021-2023).

Da die kleine Werte extremer sind als große, geht der Index negativ in den Klima-Expositions-Index ein.

⁷ https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/annual/drought_index/

Vulnerabilität (**VUL**)

VUL setzt sich zusammen aus den beiden Features *bauliche Vulnerabilität* (**VB**) und *soziale Vulnerabilität* (**VS**). So ist

$$VUL = 0,6 \cdot VB + 0,4 \cdot VS$$

Da beide Werte bereits z-normalisiert sind, braucht man hier nicht weiter normalisieren.

Bauliche Vulnerabilität (**VB**)

Besteht aus

- Altbau Anteil (**AB**)
- Siedlungs- und Verkehrsflächenanteil (**SUV**)
- Einwohnerdichte (Einwohner/km²) (**rho**)

$$VB = 0,5 \cdot z(AB)^+ + 0,3 \cdot z(SUV)^+ + 0,2 \cdot z(\rho)^+$$

Bemerkung: Wir verwenden Daten aus dem Mikrozensus 2022. Für Einwohnerdichte wäre ein Grid vorhanden.⁸ Im Zensus sind diese Daten aber auch auf Gemeindeebene enthalten.

Beim Altbauanteil haben wir uns letztlich für einen Cut bei 1979 entschieden. 1977 wurde eine Wärmeschutzverordnung⁹ in der BRD verabschiedet, die Neubauten einer umfassenden Dämmungspflicht unterwarfen. Es waren auch Sanierungen älterer Gebäude betroffen. Gleichwohl wird als Altbau alles vor 1949 bezeichnet, aber in den Daten ist dieser Anteil in der BRD fast null.. In der DDR gab es kein solches Gesetz, weniger Gebäude waren zerstört und beschädigte langsamer aufgebaut. Der Altbauanteil ist daher ein streitbarer Punkt in der Modellierung.

Soziale Vulnerabilität (**VS**)

Besteht aus

- Verfügbarem Nettohaushaltseinkommen (**NE**)
- Durchschnittliche Haushaltsgröße (**HH**)
- Anteil Personen über 65 Jahre (binning aus verfügbaren Daten) (**U65**)

$$VS = 0,4 \cdot z(-NE)^+ + 0,3 \cdot z(-HH)^+ + 0,3 \cdot z(U65)^+$$

Da die Vulnerabilität größer wird, je kleiner Nettohaushaltseinkommen sind, fließt **NE** negativ ein.

Bei der Haushaltsgröße (Anzahl Personen im Haushalt) ist eine Kernfrage: Sind kleine Haushalte resilienter als große? Man müsste es an das Einkommen koppeln. Große

⁸ <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TGS00024/default/table>

⁹ https://enev-online.de/enev/wschovo_1977_bundesgesetzblatt_1977.08.17.pdf

Haushalte mit niedrigem **NE** sind genauso verletzlich, wie kleine oder Single-Haushalte. Eine Alternative wäre angeglichenes Einkommen (equivalised income)¹⁰

$$EV_{eq} = \frac{NE}{\sqrt{HH}}$$

Und dann ohne HH als extra Faktor. Dies haben wir nicht mehr umsetzen können und belassen es bei einem „naiven“ Ansatz, der Mehrpersonenhaushalte für stabiler hält.

10

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Equivalised_income#:~:text=Equivalised%20income%20is%20a%20measure,poverty%20and%20social%20exclusion%20indicators.