



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Die Morphologie und räumliche Verteilung der
Karstformen Niederösterreichs“

verfasst von / submitted by

Fabien Chauveau, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2021 / Vienna 2021

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 066 815

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Erdwissenschaften

Betreut von / Supervisor:

Mag. Dr. Lukas Plan

DANK

Ich bedanke mich herzlichst bei all jenen, die mich im Zuge dieser Arbeit unterstützt haben. Ich möchte an dieser Stelle erstmals meinem Betreuer Lukas Plan einen großen Dank aussprechen, der durch zahlreiche Diskussionen und Hilfestellungen einen sehr wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet hat. Außerdem bedanke ich mich für das Ermöglichen der Mitarbeit am NÖ-Karst-Projekt.

Des Weiteren gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen des Höhleninstituts des Naturhistorischen Museums Wien, die für diese Masterarbeit Daten im Gelände gesammelt haben und mir diese zur Verfügung gestellt haben. Die gemütlichen gemeinsamen Mittagessen stellten einen angenehmen Ausgleich zu den aufschlussreichen fachlichen Diskussionen dar. Der Dank geht an Eva Kaminsky, Pauline Oberender und Barbara Funk.

Außerdem gilt mein Dank meiner Schwester Manon, die sich die Zeit genommen hat diese Arbeit durchzulesen und kritisches Feedback zu geben.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mich in jeder Hinsicht über all die Jahre meines Studiums bestmöglich unterstützt haben.

ZUSAMMENFASSUNG

Der alpine Raum Niederösterreichs (NÖ), insbesondere die Nördlichen Kalkalpen und die Semmering Wechsel Region sind durch verschiedene Karstformen geprägt. Dolinen stellen die markantesten und häufigsten Karstformen dar. Bislang gibt es keine Synthese aller bekannten Karstformen in NÖ und keine Zuordnung zu den geologischen Einheiten. Neben dem wissenschaftlichen Aspekt, soll diese Arbeit als Hilfsmittel bei der Gefahrenabschätzung von Landnutzung, beispielsweise landwirtschaftlicher Natur, diverser Bauvorhaben aber auch zum Schutz der Karstlandschaften dienen.

Ziel ist einerseits die Korrelation zwischen den stratigraphischen Einheiten und deren Verkarstungseigenschaften. Andererseits werden Morphologie und räumliche Verteilung der Karstformen empirisch ermittelt, beziehungsweise überprüft, ob diese bevorzugt an gewisse Lithologien gebunden sind. Es wird ein Überblick über das Ausmaß der Karstformen im alpinen Raum Niederösterreichs gegeben. Der Flächenanteil des verkarstungsfähigen Gesteins entspricht 12 % der Fläche Niederösterreichs, sowie 57 % des Untersuchungsgebietes.

Methodisch wurden Daten über die diversen Karstformen im Rahmen von Geländebegehungen erhoben. Zudem wurden Daten aus sämtlichen weiteren publizierten Karten zusammengetragen sowie mittels Fernerkundung ermittelt. Der resultierende Datensatz wird visualisiert und im Anschluss eine Reihe statistischer Auswertungen an Dolinen durchgeführt. Die räumlichen Verteilungen der Dolinen sowie Dolinenvolumina wurden mittels Kernel Function ermittelt.

Insgesamt werden 15.459 Dolinen, zwölf Glaziokarst-Hohlformen, fünf Poljen, 248 Ponore und 900 Karrenvorkommen ausgewertet. Die Gesamtfläche aller Dolinen beträgt 6,99 km², was 0,2 % der Fläche des Untersuchungsgebiets entspricht. Die statistischen Analysen der Dolinen bezüglich deren Tiefe, Fläche und Volumen zeigen eine linkssteile Verteilungskurve mit der Tendenz zur Kleinmaßstäbigkeit. Im Durchschnitt weisen die Dolinen eine Tiefe von 2,7 m, eine Fläche von 452 m² und ein Volumen von 2192 m³ auf. Die tiefste und größte Doline NÖs ist das Grünloch am Dürrenstein-Plateau, das 50 m Tiefe, 0,38 km² Fläche und 6,3 Mio. m³ Volumen aufweist.

Die dominierenden Lithologien im Untersuchungsgebiet sind mit 55 % der Gesamtfläche aller verkarstungsfähigen Lithologien Dolomitgesteine. Die Kalkformationen nehmen nur etwa 28 % und die Gipse nur etwa 3 % ein. Die Anzahl an Dolinen ist mit 71 % in den Kalken deutlich höher als in den Dolomiten, in denen lediglich 13 % aller Dolinen ausgebildet sind. In den kaum verbreiteten Gipsen des Haselgebirges und der Werfen-Formation sind 9 % der Dolinen kartiert. Die Unterscheidung der verschiedenen Kalkformationen zeigt, dass mit 38 % die meisten Dolinen im Dachsteinkalk kartiert sind. Die Dichten der Dolinenvolumina unterscheiden sich lokal deutlich, wobei vor allem Gebiete in welchen Haselgebirge und Werfen-Formation, beziehungsweise Dachsteinkalk kartiert sind, hohe Dichten zeigen. Die meisten Dolinen sind in 1400 bis 1600 m Seehöhe ausgebildet, was mit dem Anstieg der durchschnittlichen Niederschlagsmenge mit steigender Seehöhe sowie vermutlich auch glazialer Überprägung korreliert.

In einer semiquantitativen Tabelle wird die Verkarstungsfähigkeit der unterschiedlichen Lithologien klassifiziert. Aus dieser Quantifizierung der Oberflächenkarstformen in NÖ lässt sich ableiten, dass Kalke eine bessere Verkarstungsfähigkeit als Dolomite aufweisen und die meisten Karstformen im Dachsteinkalk ausgebildet sind. Neben den Kalken sind die Gipse des Haselgebirges und der Werfen-Formation extrem verkarstungsfähig.

ABSTRACT

The Alpine area of Lower Austria, especially the Northern Calcareous Alps and the Semmering Wechsel region are characterized by numerous karst features. Dolines are the most prominent ones. So far, there is no other study, which merges all karst features in Lower Austria and allocates them to the geological units. Besides scientific aspects this thesis should provide authorities to assess potential hazard of land use, especially regarding agricultural use diverse infrastructural projects as well as the protection of karst landscapes.

The aim of this thesis is the correlation between stratigraphical units and their karstification properties. Morphology and spatial distribution of karst features are empirically determined and checked if they are bound to specific lithologies. A land wide overview of the amount of karst features is given, focusing on the Alpine area of Lower Austria. The total area of soluble lithologies corresponds to 12 % of the total area of Lower Austria and 57 % of the study area.

Several methods were used to gain data of different karst features. Data was collected during field work in the course of this thesis and the NÖ-Karst-Project. Further data was compiled from diverse published maps and from Airborne-Laser-Scanning calculations. The resulting dataset is visualized and a number of statistical analyses on dolines are performed. Kernel function is used to identify the morphology and spatial distribution of dolines and doline volumes.

In total 15.459 dolines, twelve glaciokarstic depressions, five poljes, 248 ponors and 900 Karren features are analyzed. The distribution curve of statistical analyses of dolines regarding their depth, shape area and their volume point at the dominance of small-scale features. On average dolines are 2,7 m deep, have an area of 452 m² and a volume of 2192 m³. The Grünloch on the Dürrenstein-Plateau with a depth of about 50 m, an area of 0,38 km² and a volume of about 6,3 Mio. m³ represents the deepest and biggest doline in the study area.

With an amount of 55 % dolomite dominated stratigraphic units are the most common karstic lithologies in the Alpine area of Lower Austria. Limestones occupy 28 %, gypsum units 3 % of the study area. The amount of mapped dolines is highest in limestone units (71 %), far less karst features are mapped in doline units (13 %). Even though gypsums of the Haselgebirge and Werfen-Formation unit are only mapped in small areas of Lower Austria, a significant number of dolines (9 %) is mapped in this unit. The comparison of different limestone formations shows, that Dachsteinkalk represents the most dominant lithological unit regarding the number of dolines. Doline volume densities significantly differ locally. High densities occur especially in regions where the Haselgebirge and Werfen-Formation or Dachsteinkalk are mapped. The height distribution of dolines underlines, that most dolines are formed between 1400 to 1600 m above sea level, which can be correlated to the average rise of the amount of precipitation with rising altitude as well as glacial overprint during Pleistocene.

The capacity of karstification of different lithological units has been classified in a semiquantitative table. This quantification of surface karst features in Lower Austria leads to the conclusion that the karstification properties are better in limestone dominated stratigraphic units, such as the Dachsteinkalk, than in dolomite dominated lithologies. Beside limestones also the gypsum bearing units Haselgebirge and Werfen-Formation have been identified as extremely karstified.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
1.1. Ziele der Arbeit und Forschungsfragen	1
2. Untersuchungsgebiet	2
2.1. Geographischer Überblick	2
2.2. Geologischer Überblick	2
2.2.1 Böhmisches Massiv	4
2.2.2 Molasse und Waschbergzone	4
2.2.3 Wiener Becken	4
2.2.4 Rhenodanubische Flyschzone	4
2.2.5 Nördliche Kalkalpen	4
2.2.6 Grauwackenzone	6
2.2.7 Unter- und Mittelostalpin („Zentralalpin“)	7
3. Definitionen	7
3.1. Karst	7
3.1.1 Karstformen	8
3.2. Karstgesteine	8
3.2.1 Calcit und Dolomit	8
3.2.2 Anhydrit und Gips	9
3.2.3 Halit	9
3.3. Karstabtrag	9
3.4. Oberflächenkarstformen	10
3.4.1 Karstquellen	10
3.4.2 Ponore	10
3.4.3 Dolinen	10
3.4.4 Uvala	11
3.4.5 Glaziokarst-Hohlform	12
3.4.6 Polje	12
3.4.7 Karstwannen und Karstmulden	13
3.4.8 Karren	13
3.5. Karsttypen	15
3.5.1 Schichttreppenkarst	15
3.5.2 Kontaktkarst	15

4. Methodik	16
4.1. Daten	16
4.2. Geländekartierung	18
4.2.1 Im Zuge dieser Arbeit kartierte Karstformen	18
4.3. Aufbereitung der digitalisierten Daten mit ArcGIS	19
4.3.1 Datengrundlage zu Beginn der Arbeit.....	20
4.3.2 Zusammenführen aller Datenquellen und Erstellen verschiedener Shapefiles.....	20
4.3.3 Aufbereitung der Grunddaten.....	20
4.3.4 Überprüfung der einzelnen Features	22
4.3.5 Vereinheitlichung und Zusammenfassung der lithologischen Einheiten	22
4.3.6 Zuordnung der Karstformen zu den Karstgesteinen.....	25
4.4. Berechnungen mittels GIS-Daten.....	26
4.4.1 Verhältnis Tiefe zu Fläche.....	26
4.4.2 Volumen	27
4.4.3 Dolinendichte (Kernel density)	27
4.4.4 Pitting Index (R_p).....	28
5. Ergebnisse und Interpretation	28
5.1. Verkarstungsfähige Gesteine und ihre Verteilung.....	28
5.2. Charakterisierung der Karstformen	30
5.2.1 Poljen.....	32
5.2.2 Glaziokarst-Hohlformen.....	32
5.2.3 Dolinen	32
5.2.4 Karrenvorkommen.....	33
5.2.5 Ponore.....	33
5.2.6 Beispiel einer Hohlform beim Eisenstein, die keine Karstform ist	34
5.3. Karstmorphologische Karte.....	36
5.3.1 Hochkar	38
5.3.1.1. Interpretation der Karstmorphologie am Hochkar.....	39
5.3.2 Karstmorphologie am Dürrenstein	39
5.3.2.1. Interpretation der Karstmorphologie am Dürrenstein-Plateau	40
5.3.3 Puchenstuben / Annaberg	41
5.3.3.1. Interpretation der Karstmorphologie im Gebiet Puchenstuben / Annaberg	42
5.3.4 Schneeberg	43
5.3.4.1. Interpretation der Karstmorphologie am Schneeberg.....	44

5.4. Statistische Auswertungen an Dolinen.....	45
5.4.1 Statistische Beschreibung der Dolinengeometrie	45
5.4.1.1. Häufigkeitsverteilung der Dolinentiefe	45
5.4.1.2 Häufigkeitsverteilung der Dolinenfläche.....	46
5.4.1.3 Häufigkeitsverteilung der Dolinenvolumina	47
5.4.1.4 Interpretation der statistischen Beschreibung der Dolinengeometrie	48
5.4.2 Räumliche Verteilung der Dolinen.....	48
5.4.3 Räumliche Verteilung der Dolinenvolumina.....	51
5.4.4 Interpretation der räumlichen Verteilung der Dolinen und Dolinenvolumina	53
5.4.5 Pitting Index	53
5.4.5.1 Interpretation des Pitting Index	54
5.4.6 Höhenverteilung der Dolinen	54
5.4.6.1 Interpretation der Höhenverteilung der Dolinen	55
5.5. Karstformen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien.....	56
5.5.1 Verteilung der Poljen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien.....	56
5.5.2 Verteilung der Glaziokarst-Hohlformen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien	56
5.5.3 Häufigkeit der Dolinen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien	56
5.5.3.1 Normierte Häufigkeit der Dolinen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien....	59
5.5.3.2 Interpretation der Häufigkeit der Dolinen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien	59
5.5.4 Ponore.....	60
5.5.4.1 Interpretation der Ponore	62
5.5.5 Karrenvorkommen.....	62
5.5.5.1. Interpretation der Karrenvorkommen	64
6. Diskussion und Schlussfolgerung.....	65
7. Literaturverzeichnis.....	69
ANHANG	73

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Geologische Karte Niederösterreichs (aus Wessely, 2006). Die rote Umrahmung stellt das Untersuchungsgebiet dar, das als alpiner Raum NÖs bezeichnet wird. Die verschiedenenfarbigen Punkte stellen Bohrungen dar und sind für diese Arbeit nicht relevant.	3
Abbildung 2: Tektonische Einheiten der Nördlichen Kalkalpen (überarbeitet nach Schnabel et al. 2002). Die rote Linie stellt die Landesgrenze Niederösterreichs dar, die schwarze Linie mit den Markierungen die Grenzen der tektonischen Decken.	5
Abbildung 3: Doline am NE Hochkar-Plateau.	11
Abbildung 4: Skizzenhafte Erläuterung der drei Arten von Poljen (Ford und Williams 1989).	13
Abbildung 5: Unterschiedliche Karrenformen (Veress 2019).	15
Abbildung 6: Kartenausschnitt aus ArcGIS mit 1-m-Höhenschichtlinien der Sinks (in rot), wobei die äußerste Begrenzung bei 0,2m liegt, einiger Karsthohlformen am Kuhschneeberg.	16
Abbildung 7: Karstmorphologische Karte des alpinen Raum Niederösterreichs mit den im Zuge dieser Arbeit kartierten Karstformen. Die wichtigsten Gebiete und großen Karstformen sind erwähnt. A) Hochkar-Plateau; B) Dürrenstein-Plateau; C) Gebiet um Puchenstuben bis Annaberg; D) Schneeberg-Plateau. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: schattiertes ALS-Geländemodell.	19
Abbildung 8: Zusammenfassung der wichtigsten Lithologien des alpinen Raum Niederösterreichs. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: schattiertes ALS-Geländemodell.	24
Abbildung 9: Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser aller Dolinen größer 2 m und kleiner gleich 25 m. Mittels linearer Trendlinie wurde die Beziehung zwischen diesen Werten ermittelt.	27
Abbildung 10: Prozentuale Verteilung der wichtigsten Karstgesteine im alpinen Raum Niederösterreichs.	30
Abbildung 11: Zwei verschiedene Typen freiliegender Karren am Dürrenstein-Plateau. Links: Rillenkarren. Rechts: Rinnenkarren.	33
Abbildung 12: Bewachsener Ponor am Dürrenstein-Plateau.	34
Abbildung 13: Runder Wall, der die Hohlform am SE-Hang des Eisensteins bei Türnitz begrenzt. Rechts liegt die Hohlform (Foto: Eva Kaminsky).	34
Abbildung 14: Markante Hohlform mit einem Durchmesser von etwa 200 m, welche südöstlich des Eisensteins bei Türnitz liegt. Die äußere Begrenzung wird als Moränenwall interpretiert. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: schattiertes ALS-Geländemodell.	35
Abbildung 15: Hohlform am SE-Hang des Eisensteins bei Türnitz. Blickrichtung gegen Osten (Foto: Lukas Plan).	36
Abbildung 16: Karstmorphologische Karte des alpinen Raum NÖs: sämtliche bekannte auf Karstprozesse zurückzuführende Karstformen sind darin abgebildet und geben einen Überblick über deren räumliche Verteilung. A) Hochkar-Plateau; B) Dürrenstein-Plateau; C) Gebiet zwischen Puchenstuben und Annaberg; D) Schneeberg-Plateau; Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: ALS Geländemodell.	37

Abbildung 17: Karstmorphologische Karte des Hochkar-Plateaus. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: ÖK 50 und ALS Geländemodell.....	38
Abbildung 18: Karstmorphologische Karte des Dürrenstein-Plateaus. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: ÖK 50 und ALS Geländemodell.....	40
Abbildung 19: Karstmorphologische Karte der Gegend zwischen Puchenstuben und Annaberg. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: ÖK 50 und ALS-Geländemodell.....	42
Abbildung 20: Karstmorphologische Karte des Schneeberg-Plateaus. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: ÖK 50 und ALS Geländemodell.....	44
Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der Dolinen in Bezug zu ihrer Tiefe. Die Darstellung reicht nur bis 15 m Tiefe.....	46
Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung der Dolinen nach der Fläche, welche in 5-m ² -Klassen unterteilt wurde.....	47
Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Dolinenvolumina, wobei die Klassenweite 5 m ³ beträgt....	48
Abbildung 24: Karte des alpinen Raum Niederösterreichs, wobei mittels Kernel-Function die räumliche Verteilung der Dolinen ermittelt und farblich in einer nicht linearen Skala klassifiziert wurde. A) Gebiet um Puchenstuben bis Annaberg; B) Dürrenstein-Plateau; C) Schneeberg-Plateau. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: schattiertes ALS- Geländemodell.....	50
Abbildung 25: Karte des alpinen Raum Niederösterreichs, wobei mittels Kernel-Function die räumliche Verteilung der Volumina der Dolinen ermittelt und farblich in einer nicht-linearen Skala klassifiziert wurde. A) Gebiet um Puchenstuben bis Annaberg; B) Dürrenstein-Plateau mit Grünloch; C) Schneeberg-Plateau und Schneebergdörfel. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: schattiertes ALS-Geländemodell.	52
Abbildung 26: Linke Achse: Häufigkeitsverteilung der Dolinen im alpinen Raum Niederösterreichs in Bezug zur Seehöhe. Rechte Achse: Verteilung der Flächen im alpinen Raum Niederösterreichs in Bezug zur Seehöhe. Dabei sind die Seehöhen in 50-m-Intervalle unterteilt.....	55
Abbildung 27: Prozentuale Verteilung der Dolinen im alpinen Raum Niederösterreichs in Bezug zu den verkarstungsfähigen Lithologien. 18 A ... Prozentuale Verteilung der Dolinen mit Durchmessern kleiner 25 m; 18 B ... Prozentuale Verteilung der Dolinen mit Durchmessern größer gleich 25 m; 18 C ... Prozentuale Verteilung aller Dolinen.	58
Abbildung 28: Prozentuale Verteilung der Ponore in Bezug zu den verkarstungsfähigen Lithologien.	62
Abbildung 29: Prozentuale Verteilung aller Karrenvorkommen in Bezug zu den verkarstungs- fähigen Lithologien.....	64

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Ursprung der analysierten Dolinen. Aufgrund des Zielmaßstabs wurden Dolinen mit Durchmessern kleiner 25 m als Punkte, Karsthohlformen mit Durchmessern größer gleich 25 m als Polygone erfasst. Verwendete Abkürzungen: KGK ... Karstgefährdungskarte; GK ... Geologische Karte; Dol. ... Dolinen; Hf. ... Hohlformen.....	17
Tabelle 2: Zusammengeführte Shapefiles unterschiedlicher Karstformen und deren Shapefile-Typ... ..	20
Tabelle 3: Erklärung der wichtigsten im Gelände unterschiedenen Shapefiles.	21
Tabelle 4: Die Zuteilung untergeordnet auftretender Lithologien zu den definierten Haupteinheiten. Die rot hinterlegten Lithologien wurden bei den statistischen Auswertungen nicht mehr berücksichtigt.	25
Tabelle 5: Flächen der wichtigsten alpinen lithologischen Einheiten Niederösterreichs. Reine Dolomite sind grau, reine Kalke blau hinterlegt.....	29
Tabelle 6: Alle kartierten Karstformen des alpinen Raum Niederösterreichs und deren Daten- ursprung; Verwendete Abkürzungen: Dol. ... Dolinen, Gk.H. ... Glaziokarst Hohlform.	31
Tabelle 7: Unterteilung der Dolinen des alpinen Raum NÖs und deren Häufigkeiten.	32
Tabelle 8: Der Pitting Index (Rp) ausgewählter Gebiete (Ausschnitte wie in 5.3) sowie des gesamten alpinen Raum NÖs. Der Reziprokwert [1/Rp] des Pitting Index multipliziert mit 100 ergibt den prozentualen Anteil der Dolinenfläche an der Gesamtfläche.	54
Tabelle 9: Häufigkeit der Dolinen in Bezug zu den verkarstungsfähigen Lithologien. D ... Doline. Lithologien mit signifikanten Unterschieden zwischen $D < 25$ m und $D \geq 25$ m sind gelb hinterlegt.....	57
Tabelle 10: Normierte Häufigkeit der Dolinen des Untersuchungsgebietes in Bezug zur Lithologie.	59
Tabelle 11: Anzahl an Ponoren gereiht nach Lithologie (linke Tabelle), sowie gereiht nach der normierten Häufigkeit der Ponore je km^2 (rechte Tabelle).....	61
Tabelle 12: Häufigkeiten der Karrenvorkommen in den verkarstungsfähigen Lithologien in absoluten Zahlen.....	63
Tabelle 13: Semiquantitative Klassifizierung der Häufigkeit von Karstformen in unterschiedlichen Lithologien. XXXX ... extrem häufig; XXX ... häufig ; XX ... etliche; X ... wenige; - ... kaum bis keine; Verwendete Abkürzungen: Dol. ... Doline.....	65
Tabelle 14: Einteilung sämtlicher stratigraphischer jurassischer Einheiten zu den Gesteinen der verkarstungsfähigen und nicht-verkarstungsfähigen Jura i.A.....	73

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit erfolgte im Rahmen des Projektes „NÖ-Karst – Digitale karstgeomorphologische Karte Niederösterreichs“ der Karst- und Höhlen-Arbeitsgruppe am Naturhistorischen Museum Wien unter der Projektleitung von Lukas Plan. Diese beleuchtet die Morphologie und räumliche Verteilung der Karstformen des alpinen Raum Niederösterreichs (NÖs). Das übergeordnete Projekt des Geologischen Dienstes des Landes NÖ zur Digitalisierung bestehender Karten mit der Aufnahme sämtlicher Karsterscheinungen des Landes läuft seit 2016 und wurde im Mai 2021 abgeschlossen (Plan et al. 2019).

Die landesweite Aufnahme der Karstformen NÖs bietet den Behörden eine Hilfestellung bei der Gefahreneinschätzung sowohl für diese Formen als auch für durch sie induzierte Schäden. Die erstellte Karte ermöglicht eine exakte Lokalisation diverser Oberflächenformen und Hohlräume. Die Vulnerabilität von Karstwässern ist relativ hoch, weshalb das Wissen der Behörden über die Erstreckung der Einzugsgebiete wichtig ist. Als Beispiel sind an dieser Stelle Rax und Schneeberg als Quellgebiete der Wiener Hochquellenwasserleitung zu nennen, welche als Naturschutzgebiete eingetragen sind, um weiterhin zum Erhalt der guten Wasserqualität des Wiener Wassers beitragen zu können. Bezüglich der Qualitätssicherung ist es essentiell zu wissen, welche Flächen nur unter strengen Einschränkungen für etwaige Nutzung freigegeben werden dürfen.

Außerdem soll die erhobene Datengrundlage ein Hilfsmittel bei der Gefahrenabschätzung diverser Bauvorhaben darstellen. Dies betrifft unter anderem Steinbruch- und Straßenerweiterungen, Tunnelbau und den privaten Hausbau. Dadurch sollen mögliche künftige landschaftliche, finanzielle und personelle Schäden vermieden werden.

Etwa ein Fünftel des österreichischen Staatsgebietes fällt auf Karstgebiete. Diese sind in vor- bis hochalpinen Gebieten am Nordrand der Alpen dominant, wo sich fast die Hälfte des Niederschlagswassers in Österreich sammelt (Pavuza und Plan 2011). Auch in NÖ sind Karstgebiete weit verbreitet.

1.1. Ziele der Arbeit und Forschungsfragen

Die für das vom Geologischen Dienst des Landes NÖ in Auftrag gegebene NÖ-Karst-Projekt zusammengetragenen Daten sind mit eigenen Geländedaten zu ergänzen und anschließend in einer einheitlichen und auf einem Geographischen Informationssystem (GIS) basierten Karte mit sämtlichen Oberflächenkarstformen zusammenzuführen. Neben den in der Einleitung genannten Gründen sollen vor allem auch offene wissenschaftliche Fragestellungen verfolgt werden.

Ein Hauptaugenmerk liegt auf der Quantifizierung und Identifizierung der Zusammenhänge zwischen den stratigraphischen Einheiten und deren Verkarstungseigenschaften. So soll empirisch ermittelt werden, ob die Morphologie und räumliche Verteilung der Karstformen an gewisse Lithologien gebunden sind. Im Zuge dessen wird quantifiziert, ob z.B. in mächtigen Plattformen der lagunären oder rifffaziellen Kalksteine, in Dolomitgesteinen oder in Mergeln erhöhte Dichten an Oberflächenhohlformen beobachtet werden. Einen wesentlichen Bestandteil dafür stellt die Differenzierung der unterschiedlichen, im Gelände aufgenommenen und beschriebenen Karstformen dar. Die Erhebung von Flächen und Tiefen der Dolinen und Poljen, sowie die aus diesen Attributen

berechneten Lösungsvolumina, dienen der Ermittlung der Dolinendichte, anhand derer ein landesweiter Überblick über das Ausmaß der Verkarstung gegeben wird.

2. Untersuchungsgebiet

2.1. Geographischer Überblick

NÖ stellt mit einer Fläche von 19.186 km² das größte Bundesland Österreichs dar und liegt im NE des Landes. Der Großteil der Flächen fällt auf landwirtschaftlich genutzte Gebiete und Wälder. NÖ wird in folgende Viertel eingeteilt:

1. Waldviertel
2. Weinviertel
3. Mostviertel
4. Industrieviertel

Die bedeutendsten und auch im Zuge dieser Arbeit untersuchten Berge NÖs sind der Schneeberg (2076 m.ü. Adria), die Rax (2007 m, höchster Punkt im NÖ Landesgebiet auf 1943 m), der Ötscher (1893 m), der Dürrenstein (1878 m), die Schnealpe (höchster Punkt NÖs 1828 m), das Hochkar (1808 m; auch Göstlinger Alpe genannt) und der Göller (1766 m). Alle genannten Berge liegen im Mostviertel.

2.2. Geologischer Überblick

Die Geologie NÖs ist, wie in Abbildung 1 ersichtlich, sehr vielfältig. Das variszische Kristallin der Böhmischem Masse, sämtliche tektonischen Großeinheiten des Alpengürtels, ein kleiner Anteil der Karpaten sowie die dadurch entstandene Molassezone sind dort aufgeschlossen (Wessely 2006). Diese Arbeit beleuchtet die Morphologie und räumliche Verteilung der Karstformen im alpinen Raum NÖs, zu welchem die Nördlichen Kalkalpen (NKA), die Flyschzone sowie das Zentralalpin der Semmering Wechsel Region gezählt werden. Um ein konkreteres Bild der Verkarstung dieses Gebiets zu bekommen, in denen die meisten Karstformen kartiert wurden, wird der Fokus dieser Arbeit auf dieses Gebietes gelegt. Aus diesem Grund werden die Ernstbrunner Kalke der Klippenzone, die Hainburger Berge, das Leithagebirge sowie die Böhmischem Masse nicht berücksichtigt.

Im Folgenden werden die wichtigsten tektonischen Einheiten NÖs kurz beschrieben, wobei das Augenmerk auf der Verkarstungsfähigkeit und den hydraulischen Eigenschaften der Lithologien liegt.

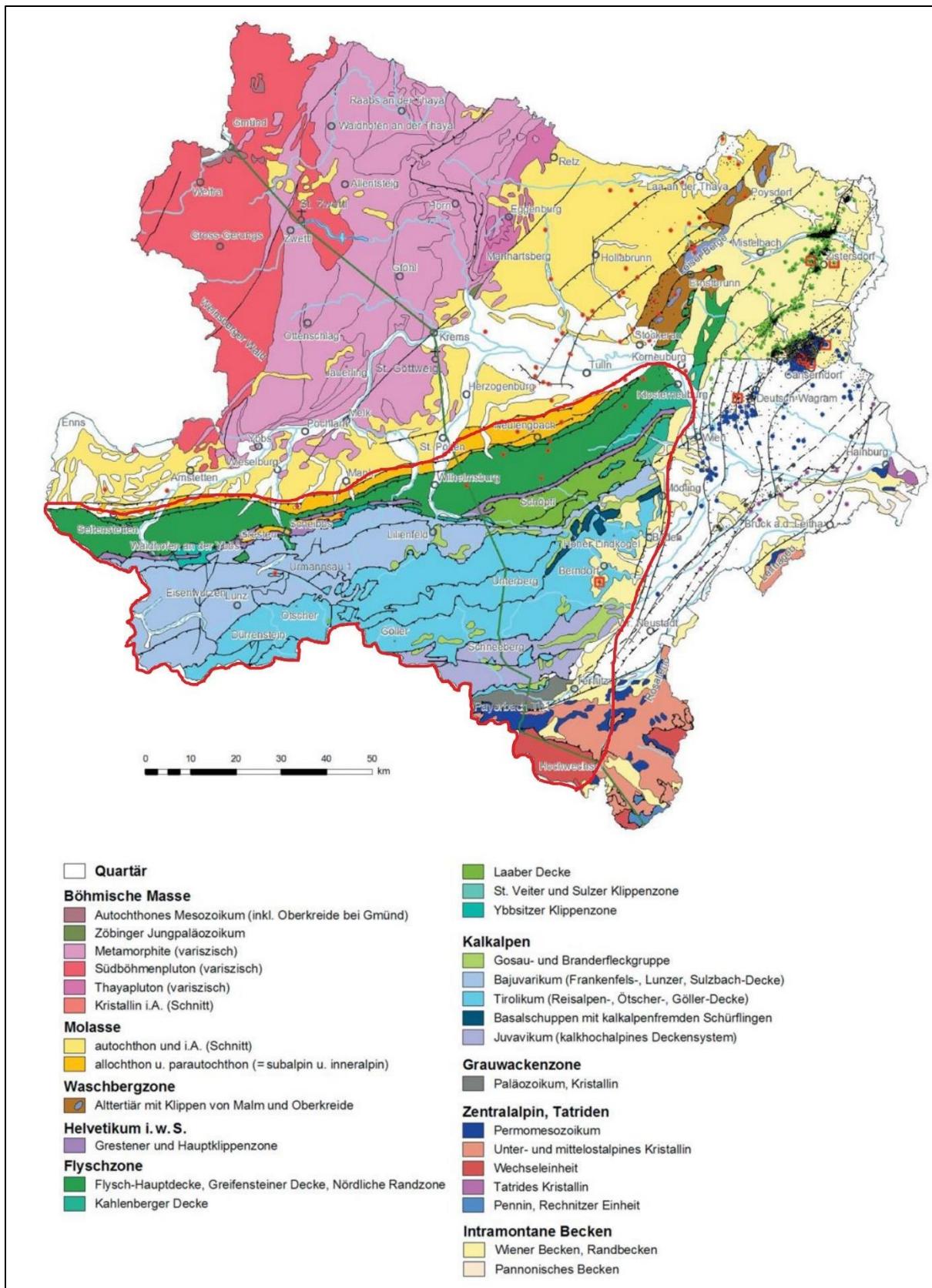


Abbildung 1: Geologische Karte Niederösterreichs (aus Wessely, 2006). Die rote Umrahmung stellt das Untersuchungsgebiet dar, das als alpiner Raum NÖs bezeichnet wird. Die verschiedenenfarbigen Punkte stellen Bohrungen dar und sind für diese Arbeit nicht relevant.

2.2.1 Böhmisches Massiv

Die Böhmisches Massiv ist Teil des variszischen europäischen Grundgebirges, welches sich im Jungpaläozoikum bei der Kollision von Gondwana und Laurasia zum Superkontinent Pangaea erhaben, und dessen nach hunderten Millionen Jahren Verwitterung und Erosion ausgesetzten Gipfel heute nur mehr Hügel und kleine Berge darstellen, die sich über den Großteil des Waldviertels sowie den Dunkelsteiner Wald und die Neustadtler Platte südlich der Donau erstrecken (Schnabel et al. 2002). Die hier vorwiegend aufgeschlossenen Kristallingesteine (Granite, Gneise, Amphibolite) stellen nicht-verkarstungsfähige Lithologien dar. Vereinzelt tritt Karst lokal in den Marmoreinschaltungen der Bunten Serie des Moldanubikums auf (Wessely 2006).

2.2.2 Molasse und Waschbergzone

Die Molassezone bildet das nördliche Vorland der Alpen. Sie erstreckt sich in NÖ vom Donauraum bis ins westliche Weinviertel und wird überwiegend aus klastischen Sedimenten aufgebaut, die ab dem Eozän in einem Meeresbecken zwischen Böhmischem Massiv und Alpen abgelagert wurden. Der südlichste Abschnitt, die „subalpine“ Molasse, stellt eine von ihrer ursprünglichen Basis abgescherte junge tektonische Einheit des Alpennordrandes dar. Diese findet ihre Fortsetzung nördlich der Donau in Form der Waschbergzone, welche ebenfalls aufgeschuppte Klippen des ehemaligen Molasseuntergrunds enthält. Zu erwähnen ist hierbei die Ernstbrunner Formation, die aus gut verkarstungsfähigen mesozoischen Kalken aufgebaut ist (Wessely 2006).

2.2.3 Wiener Becken

Das Wiener Becken ist ein Pull-Apart-Becken, welches in Folge einer sinistralen Blattverschiebung entstand, die nach wie vor aktiv ist und die Verbindung zwischen der Mur-Mürz-Störung in den Ostalpen und den Westkarpaten bildet (Decker 2020). Die Beckenfüllung besteht aus einer Abfolge von Tonen, Sanden, Mergeln und Konglomeraten unterschiedlicher Permeabilität (Wessely 2006). An den Rändern des Wiener Beckens sind verkarstungsfähige Lithologien aufgeschlossen, wobei hier die Leithakalke aus dem Karbonatischen Baden sowie Konglomerate und Brekzien mit karbonatischen Komponenten und Zementen (z.B. Gainfarner Brekzie) zu erwähnen sind (Pavuza et al. 1984).

2.2.4 Rhenodanubische Flyschzone

Die Rhenodanubische Flyschzone zählt zum Penninischen Deckensystem der Ostalpen, schließt südlich an die Molassezone an und erstreckt sich ostwärts bis zum Bisamberg nördlich von Wien. Sie setzt sich zusammen aus einer Wechselfolge von Mergel, Sand- und Tonstein, die von Kreide bis Eozän, in einem dem Kontinentalhang angrenzenden Tiefseetrog, abgelagert wurden. Lediglich in vereinzelt zwischengeschalteten, stratigraphischen Einheiten, wie etwa in Kalken der ultrahelvetischen Grestener Klippenzone kann Verkarstung beobachtet werden (Schubert 2006).

2.2.5 Nördliche Kalkalpen

Die Nördlichen Kalkalpen (NKA), welche dem Oberostalpin zugeordnet werden, erstrecken sich über mehr als ein Fünftel der Landesfläche NÖs, streichen in Ost-West-Richtung und erreichen eine Mächtigkeit von bis zu 8 km. Dieser höchste Teil des Ostalpins wird in die tektonischen Einheiten des

Bajuvarikums, Tirolikums und Juvavikums unterteilt (Abb. 2). Die meist karbonatische Schichtfolge reicht vom Oberperm über das Mesozoikum bis ins Paleozän, ist aber aufgrund unterschiedlicher Ablagerungstiefen und Sedimentationsräume in den verschiedenen Einheiten unterschiedlich ausgeprägt (Wessely 2006). Die mächtigen Karbonatplattformen aus Dachsteinkalk (z.B. am Ötscher, Hochkar, Dürrenstein und an der Hohen Wand), sowie die massigen Wettersteinkalke (am Schneeberg- und Rax-Plateau) prägen die höchsten und mittleren Einheiten der NKA (Plan et al. 2016). Sie bauen die meisten Hochplateaus in NÖ auf und stellen große verkarstungsfähige Flächen dar (Wessely 2006).

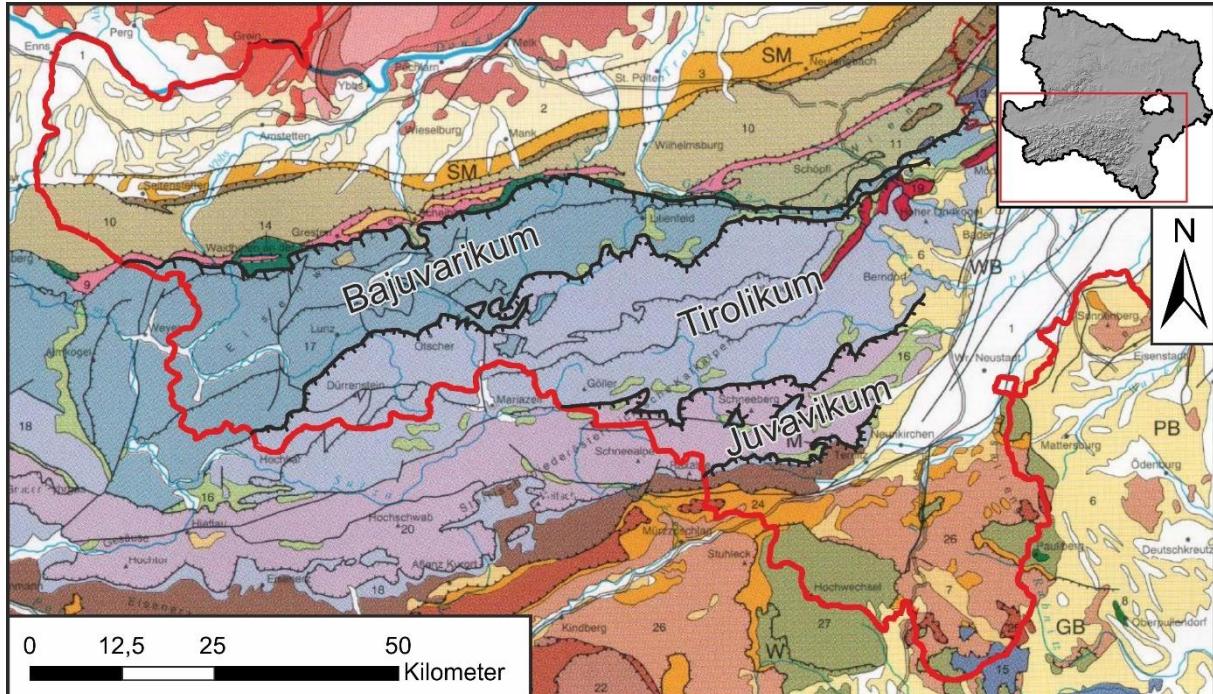


Abbildung 2: Tektonische Einheiten der Nördlichen Kalkalpen (überarbeitet nach Schnabel et al. 2002). Die rote Linie stellt die Landesgrenze Niederösterreichs dar, die schwarze Linie mit den Markierungen die Grenzen der tektonischen Decken.

An der Basis der NKA liegen in der Regel das Haselgebirge (Perm) und die Werfener Schichten (Untertrias), die aus wasserstauenden Ton- und Sandsteinen aufgebaut werden, in die jedoch teils mächtige Gipse und mitunter auch Steinsalz des Haselgebirges eingeschalten sind, welche sehr gut verkarsten (Wessely 2006).

Im mittleren Anis (Mitteltrias) kam es zu erhöhter Karbonatsedimentation in einem flachen Schelfmeer, woraus die dünnbankigen, dunkelgrauen Gutensteiner Kalke entstanden. Diese werden vom Steinalmkalk überlagert, der hellgrau und dickbankig ist und typischerweise Dasycladaceen enthält. Im Oberanis bis Ladin (Mitteltrias bis unterste Obertrias) kam es zum Zerbrechen der Karbonatplattform und dadurch zu lokal starker Subsidenz. Im Bereich der flachen Karbonatplattformen der Riff- und Lagunen-Fazies wurden der Wettersteinkalk und -dolomit abgelagert, im Intraplattformbecken die Reifling-Formation und im tieferen Schelf-Becken die Lithologien der Hallstätter Fazies. Im mittleren Karn (untere Obertrias) kam es zum „Raibler Event“, einem tektonisch bedingten Meeresspiegeltiefstand, wodurch es zur Freilegung der Karbonatplattformen kam, die durch siliziklastische Einschüttungen vom europäischen Hinterland überdeckt wurden. Die im Zuge dessen abgelagerten wasserstauenden Sandsteine und Tonschiefer werden den Raibler Schichten im Westen sowie den Lunzer Schichten im Osten Österreichs zugeordnet. Feinklastische Einschüttungen in die

Hallstätter Fazies werden als Reingrabener Schiefer bezeichnet. Diese Gesteine fungieren als Wasserstauer.

An der Wende vom Karn zum unteren Nor (untere Obertrias) wurde unter extrem salinen und seichten Wasserbedingungen die Opponitzer Formation abgelagert. Die Opponitzer Kalke divergieren in ihrem Erscheinungsbild, von massig bis geschichtet sowie grauer bis braun-grauer und manchmal rötlicher Farbe. Mit Annäherung zur Küstenlinie dominieren Rauhwacken, welche oftmals aus dunklen Dolomiten und Anhydriten aufgebaut werden (Wessely 2006).

Im Nor (mittlere Obertrias) kam es zur Transgression, weshalb die Karbonatproduktion im Schelfbereich wieder anstieg, was zur Ablagerung des Hauptdolomits im Ostabschnitt und des Dachsteinkalks mit Riff- und Lagunensedimenten im Mittelabschnitt der Ostalpen führte (Krainer 2016). Eine zyklische Kalkstein-Dolomit-Wechselfolge, zwischen Hauptdolomit und Dachsteinkalk, aus dem Gezeiten-Watt der Lagune vermittelt der norische Plattenkalk (Schnabel et al. 2002). Im tiefen Schelf-Becken wurde wiederum der pelagische Hallstätter Kalk abgelagert.

Im Nor bis Rhät (obere Obertrias) lagerte sich in der kontinental beeinflussten Lagune des Schelfmeeres der Hauptdolomit ab. Dieser ist zumeist homogen, gut gebankt und teils von feinrhythmischen Stromatolithen Matten aufgebaut. Die in den NKA bis zu 2 km mächtige Lithologie ist Teil des Tirolikums und der Göller Decke. Schichtweise kann er aber durch Einschaltungen kontinentaler Fazies sowie geringe Quarzsandgehalte unterteilt und daher als heterogen beschrieben werden, wobei diese Form des Hauptdolomits der Frankenfelser Decke zugeteilt wird (Wessely 2006).

Im Rhät (Obertrias) gab es nach wie vor eine Faziesdifferenzierung, wobei in den Becken die schlecht verkarstungsfähige Kössen- und Zlambach-Formation (dunkle Mergel mit zwischengeschalteten Kalkbänken) abgelagert wurden. Außerdem wurde gleichzeitig auch der verkarstungsfähige Oberrähkalk abgelagert (Krainer 2016).

Zu Beginn des Jura kam es zur Schließung des Meliata-Hallstatt-Ozeans und zur Öffnung des Penninischen Ozeans, die wiederum zu einer allgemeinen Absenkung des Ablagerungsraumes der NKA führten. Mergel, Kieselkalke und Radiolarite sind, bis auf ein paar Ausnahmen, die dominierenden Gesteine von Jura und Kreide (Krainer 2016). Zu den Ausnahmen im Jura zählen etwa der lokal auftretende Hierlatzkalk, die Oberalmer Schichten und der Plassenkalk.

Die jüngste Schichtfolge der NKA sind die diskordant gelagerten Sandsteine, Mergel und Konglomerate der oberkretazischen bis paleozänen Gosau-Gruppe (Wessely 2006). Kalke wie der Kambühelkalk treten nur selten auf und die Verkarstungseigenschaften der Gesteine der Gosau-Gruppe sind unbedeutend.

2.2.6 Grauwackenzone

Die Basis der NKA bildet die südlich davon aufgeschlossene Grauwackenzone, welche ebenfalls Teil des Oberostalpins ist. In NÖ ist diese Einheit jedoch nur im SE in einem schmalen Streifen um den Semmering aufgeschlossen. Aufgebaut wird sie aus schwach metamorphen paläozoischen Feinklastika, etwa Phylliten oder Tonschiefern sowie Metavulkaniten, welche alle durch geringe Permeabilität charakterisiert werden. Vereinzelt treten auch zwischengeschaltene devonische Karbonate auf, in denen Verkarstung auftritt (Schubert 2006).

2.2.7 Unter- und Mittelostalpin („Zentralalpin“)

Das Unter- und Mittelostalpin baut im SE des Bundeslands den Bereich Semmering und Wechsel, die Bucklige Welt und das Leithagebirge auf. Die tektonische Einheit des Unterostalpins liegt unter dem Mittelostalpin und beide Einheiten bestehen aus einem kristallinen Kern umhüllt von permomesozoischen Meta-Sedimentgesteinen (Schnabel et al. 2002). Die Basis der Schichtfolge bilden wasserstauende Quarzite und Phyllite des Perms. Darüber folgen gut gebankte, weiße bis blass grüne, reine Quarzite der Untertrias, die den etwa 200 m mächtigen Semmering Quarzit aufbauen. Dieser wird von teils mächtigen mitteltriassischen Metakarbonaten überlagert, welche wiederum stark verkarstungsfähig sind und teilweise von aquitarden Horizonten, bestehend aus Ton- und Sandsteinen, unterbrochen werden (Schubert 2006). Weitestgehend ähnlich aufgebaut sind die im Zuge dieser Arbeit nicht berücksichtigten Hainburger Berge im äußersten Osten NÖs. Lediglich der Metamorphosegrad, den die kristallinen Kergesteine erfuhren, erscheint deutlich geringer gewesen zu sein. Tektonisch werden diese bereits den Tatriden zugeordnet (Schnabel et al. 2002).

3. Definitionen

3.1. Karst

Als Karst wird eine Landschaftsform beschrieben, in der zahlreiche Höhlen und ausgedehnte Grundwassersysteme beobachtet werden, die sich im löslichen Gestein, etwa Kalkstein, Dolomit, Marmor, Gips oder Steinsalz, gebildet haben. Karstlandschaften werden bevorzugt unterirdisch entwässert und sind charakteristischerweise von groß- bis kleinmaßstäblichen Oberflächenformen wie Dolinen, Poljen und Karren geprägt (Ford und Williams 2007).

Auf Höhe der Verkarstungsbasis können meist große Quellen beobachtet werden, die als Folge der guten Löslichkeit des Gesteins entstanden (Ford und Williams 2007).

Zur Bildung von Karst müssen zwei Rahmenbedingungen gegeben sein. Einerseits bedarf es Wasser, welches in Bezug auf das lösliche Mineral untersättigt ist, und andererseits braucht es einen Fluidfluss, um die gelösten Ionen abzutransportieren, bevor sich das Fluid an gelösten Ionen übersättigt. Solche Gegebenheiten finden sich in meteorisch vadosen und phreatischen Zonen, wo untersättigte, gravitativ angetriebene Wässer fließen (Lohmann 1988).

Als Epikarst wird die oberflächennahe Zone des Gesteins bezeichnet, die stark verwittert vorliegt und in der sich rezente Karstformen entwickeln. Das Gegenstück dazu bilden die im Untergrund entstandenen Karstformen, der Endokarst. Weiters wird bezüglich des Ursprungs der Lösungswässer unterschieden. So gibt es a.) den epigenen Karst, wo meteorische und b.) den hypogenen Karst, wo juvenile, hydrothermale oder mit Stoffen (z.B. H_2S oder geogenes CO_2) angereicherte Tiefenwässer zur Verkarstung führen (Ford und Williams 2007). Epogene Karsthöhlen stehen daher im genetischen Zusammenhang mit diversen Oberflächenhohlformen, wohingegen die in Österreich eher seltenen hypogenen Karsthöhlen oft nur mit Karstquellen in genetischem Zusammenhang stehen. In NÖ finden sich hypogene Höhlen, die in Zusammenhang mit den Thermalwässern des Wiener Beckens stehen. Oberflächliche durch Verkarstung entstandene Formen sind als Exokarst charakterisiert (Spötl und Plan 2016).

3.1.1 Karstformen

Karstformen, sowohl endogen als auch exogen, entstehen vorrangig durch chemische Lösung des Gesteins. Neben den korrosiven Prozessen kann, insbesondere bei der Bildung großmaßstäblicher Karstformen, zudem mechanische Erosion und Verwitterung eine Rolle spielen (Ford und Williams 2007; Spötl und Plan 2016).

Wichtige polygenetische Karsttypen sind Glazio- und Fluviokarst. Bei Ersterem entstehen Oberflächenformen durch Lösungsprozesse in Verbindung mit mechanischer Erosion durch Gletscher. Dabei werden postglaziale, nach der letzten Eiszeit entstandene, präglaziale, vor dieser entstandene, und periglaziale, durch das Zusammenspiel von Frostverwitterung und Erwärmung der nicht ganzjährig gefrorenen Gebiete entstandene, Strukturen unterschieden (Meneghel und Sauro 2006). Als Fluviokarst bezeichnet man alle Karstformen, die durch Karst- und fluviatile Prozesse entstehen. Dazu zählen Karst-Trockentäler, fluviatile Canyons, Uvalas und Poljen (Sauro 2013).

Karst-Trockentäler sind Täler, in denen ein durchgehender Wasserlauf wegen auftretender Dolinen und Ponore nicht mehr möglich ist. Sie entstanden ursprünglich durch oberflächlichen Abfluss und fielen erst mit einsetzender Verkarstung trocken (Fink 1973).

Karstquellen stellen nach Bögli (1978) Wasseraustritte aus karsthydrologisch aktiven Hohlräumen in wasserlöslichen Gesteinen dar, welche sowohl an der Erdoberfläche als auch unterirdisch austreten. Eine ausführliche Klassifizierung und Quantifizierung der Karstquellen NÖs liefert die Masterarbeit von Schmalfuß (2020), die ebenfalls im Rahmen des NÖ-Karst-Projektes erfolgte.

Karsthöhlen stellen natürliche, vom Menschen befahrbare Hohlräume dar, welche durch Gesteinslösung entstanden sind (Ford und Williams 2007). Sowohl Karsthöhlen, als auch Karst-Trockentäler, Paläokarst und Karstquellen werden in dieser Arbeit nicht näher behandelt.

3.2. Karstgesteine

3.2.1 Calcit und Dolomit

Die Verkarstung von Karbonaten beruht auf der chemischen Lösung des Gesteins, wobei Kalkstein und Dolomit sich in reinem Wasser kaum lösen. Erst durch den Zusatz von Kohlendioxid, welches vor allem aus dem Boden oder aus der Luft stammt und dessen Lösung im Wasser, wird das chemische Lösungspotential des Wassers erhöht und somit die Gesteinslösung beschleunigt. Die Gleichung (1) beschreibt die Lösung von reinem Kalkstein, Gleichung (2) jene von Dolomit. Beide Reaktionen können aber auch in umgekehrter Richtung ablaufen, wenn Karbonat aus dem Wasser gefällt wird (Ford und Williams 2007).



3.2.2 Anhydrit und Gips

Die Löslichkeit von Gips ist unabhängig von Kohlendioxid und um ein Vielfaches höher als die von Karbonaten. Gips entsteht aus Anhydrit und Wasser und führt zu einer markanten Volumszunahme, wodurch geomorphologische Veränderungen initialisiert werden können (Ford und Williams 2007). Für eine ausführliche Charakterisierung sowie einen Einblick in die Verbreitung des Gipskarst in NÖ wird auf die Masterarbeit von Winkler (2019) verwiesen.

3.2.3 Halit

Halit ist in der Regel nur in ariden Klimaten aufgeschlossen, wo er auch Karsterscheinungen zeigt und ist deutlich löslicher als Karbonate (Ford und Williams 2007). In NÖ weist lediglich die Quelle in Salzerbad im Tirolikum von Kleinzell bei Hainfeld eine Vergesellschaftung von Tonschiefern mit Haliten auf. Abgesehen davon ist Steinsalz in NÖ aber unbedeutend (Wessely 2006).

3.3. Karstabtrag

Als Karstdenudation wird die Menge an gelöstem Gestein bezeichnet, welche in der Regel in $\mu\text{m/a}$ angegeben wird. Diese Messung kann z.B. mittels des Karstphänomens Karsttische erfolgen. Diese entstehen in Folge glazialer Erosion durch die Ablagerung eines Blocks auf einer vom Gletscher freigelegten Fläche anstehenden Karstgesteins. Rings um den schützenden Block wird die Fläche durch die Niederschlagswässer abgetragen, wodurch im Laufe der Zeit ein Sockel entsteht, der den Oberflächenabtrag seit dem Gletscherrückzug anzeigt (Bögli 1978).

In anderen Arbeiten wurden Massenbilanzen angewandt, um die Karstdenudation zu berechnen. So werden Kalkplättchen, bekannten Gewichts und Fläche freiliegend oder unter Bodenbedeckung, über einen bestimmten Zeitraum (meist ein Jahr) den klimatischen Einflüssen ausgesetzt. Im Anschluss wird aufgrund des Gewichtsverlusts die Kalkdenudation berechnet. Plan (2005a) hat für den Hochschwab $13\text{--}40 \mu\text{m/a}$ unter Bodenbedeckung und etwa $10 \mu\text{m/a}$ für direkt dem Regen exponierte Kalkplättchen bestimmt. Diese Werte stimmen mit anderen Kalkulationen des Karstabtrages in ähnlich gemäßigten Klimazonen und Seehöhen überein (White 2000; Pavuza und Oberender 2013).

Für die Kläfferquelle wurde von Plan (2005a) aus hydrochemischen Datenreihen eine Denudationsrate von $95 \mu\text{m/a}$ ermittelt. Verglichen mit den Werten des Oberflächenabtrags am Hochschwab ergibt sich eine Differenz von $55\text{--}84 \mu\text{m/a}$. Dies unterstreicht, dass ein Großteil der in Quellwässern enthaltenen Ionen erst im Berg gelöst werden.

Karsterscheinungen sind in der Regel im Dolomit aufgrund der schlechteren Löslichkeit des Gesteins seltener. Palmer (2007) beschreibt Dolomit als besser löslich, jedoch ist seine Lösungskinetik deutlich langsamer. Durch die schlechteren mechanischen Eigenschaften ist Dolomit zudem anfälliger für spröde Deformation, beispielsweise durch Frostverwitterung. In stark zerklüftetem Gestein ist die Ausbildung von Karstformen stark eingeschränkt und Kluftaquifere dominieren.

3.4. Oberflächenkarstformen

Die Oberflächenkarstformen sind, neben der Wasserlöslichkeit der Gesteine und der unterirdischen Entwässerung ein wesentliches Charakteristikum, welches Karst definiert (Cvijic 1893). Im Zuge dieser Arbeit wurden vor allem die Karsterscheinungen an der Erdoberfläche aufgenommen und beschrieben. Die Definitionen der diversen Exokarstformen wurden aus unterschiedlichen Werken übernommen und gelten hauptsächlich für Kalksteine und Dolomite (Bögli 1978; Ford und Williams 2007; Spötl et al. 2016).

Vielerorts können speziell ausgeprägte Hohlformen in Karstgestein nicht ausschließlich auf Verkarstung zurückgeführt werden. So haben etwa Oberender und Plan (2018) in ihrer Arbeit festgestellt, dass annähernd die Hälfte der Höhlen in NÖ nicht durch Verkarstungsprozesse, sondern durch andere Prozesse wie mechanische Verwitterung und/oder Erosion entstanden sind. Wie schon Fink (1973) beschrieb entstanden in den Ostalpen viele Oberflächenhohlformen durch Verkarstung und glaziale Überprägung während der letzten Eiszeiten.

3.4.1 Karstquellen

Der Abfluss der Karstwässer erfolgt über Karstquellen, welche meist an lithologische Grenzen oder den Vorfluter (das Talniveau) gebunden sind, sowie in den Grundwasserkörper. Bezuglich der im Rahmen des NÖ-Karst-Projekts erhobenen Daten über Karstquellen NÖs wird auf die Masterarbeit von Schmalfuß (2020) verwiesen.

3.4.2 Ponore

Formen durch die Oberflächengerinne punktuell in den Untergrund treten, sind als Ponore beziehungsweise Schwinden definiert. Manchmal stellen Ponore befahrbare Höhlen oder Schächte dar, zumeist sind die unterhalb von Ponoren liegenden Karsthohlräume aber durch Holz oder Blockwerk verlegt und nicht befahrbar. Verschwindet das Oberflächengewässer diffus und nicht punktuell, wird dieses Phänomen als Versickerung bezeichnet.

3.4.3 Dolinen

Die bedeutendste und auffälligste Exokarstform, welche von wenigen Metern bis mehreren hundert Metern reichen kann, ist die Doline (Abb. 3). Sie stellt meistens geschlossene, watten-, schüssel- oder trichterförmige Hohlformen dar, kann in einigen Fällen aber auch als schachtartiges Loch ausgeprägt sein. Nach Fink (1973) gilt, dass die Karsthohlförm als Doline angesprochen wird, wenn deren Durchmesser größer ist als dessen Tiefe. Wenn die Hohlform tiefer ist als breit, wird sie als Schachtdoline angesprochen. Viele dieser im hochalpinen Raum angetroffenen Schachtdolinen entstanden durch die Erosion der Gletscher der letzten Eiszeiten, durch die ursprünglich über diesem Hohlraum liegenden Gesteine wegerodiert wurden. Strukturen, die Dolinen ähneln, aber ganz anders entstanden, sind etwa Toteislöcher, Pingen, Hohlformen über Massenbewegungen, aber auch Bombentrichter. Die Unterscheidung ist oft schwierig und Verwechslungen sind nicht selten (Plan 2016).

Grundsätzlich werden Dolinen je nach Entstehungsprozessen in Lösungs- und Einsturzdolinen unterteilt. Erstere entstehen durch die Korrosion des Gesteins an der Oberfläche, wobei das Wasser

bevorzugt geologischen Trennflächen, wie etwa Störungen, Klüften und Schichtfugen, folgt und diese Initialfugen durch das primär laminar fließende Wasser lösen und erweitern (Plan 2016). Hier treten positive Rückkopplungen auf: Je größer eine Karströhre wird, desto mehr Wasser nimmt sie auf, wodurch sie sich schneller als die umliegenden Fugen erweitert. Ab einem Durchmesser von etwa 5 - 10 cm beginnt das Wasser turbulent zu fließen, was zu stärkerer Lösung und einer Wachstumsbeschleunigung führt (Harmand et al. 2017). Zudem beginnt bei größeren Durchmessern auch Erosion eine Rolle zu spielen, wenn beispielsweise Bruchschutt abtransportiert wird.

Zweitere, Einsturzdolinen, entstehen beim Zusammenbruch unterirdischer Hohlräume. Unterhalb vieler großer Dolinen finden sich Karsthöhlen, welche sich anhand der Lösung oder dem Nachbrechen der Gesteinsdecke nach oben hin erweitern können und dann Einsturzdolinen bilden. Oft ist die genaue Unterscheidung der beiden Dolinentypen nicht eindeutig, da sich beide aus dem jeweilig anderen Typus weiter entwickeln können (Plan 2016).

Trichterförmige Suffosionsdolinen bilden sich durch die Verlagerung von Lockersediment (z.B. Moränenmaterial) in darunterliegende Karsthohlräume (Bögli 1978).



Abbildung 3: Doline am NE Hochkar-Plateau.

3.4.4 Uvala

Uvalas sind geschlossene Vertiefungen im Karst, die deutlich größer als Dolinen, jedoch auch kleiner als Poljen sind, und deren irreguläre längliche Form auf die beschleunigte Korrosion entlang großer tektonischer Störungen und Klüfte zurückzuführen ist. Die Böden dieser Karstformen können wellig und von einer Vielzahl an Dolinen durchlöchert sein, selten sind kolluviale Sedimente anzutreffen und stets werden diese Hohlformen oberhalb des Karstwasserspiegels lokalisiert (Ćalić 2011). Uvalas werden in der Karsthydrogeologie oft vernachlässigt und nicht differenziert.

3.4.5 Glaziokarst-Hohlform

Glaziokarst-Hohlformen sind Karstformen, welche während der pleistozänen Kaltzeiten durch glaziale Prozesse, beispielsweise durch Karenbildung, überprägt wurden und anschließend wieder durch Karstprozesse beansprucht wurden (Bini et al. 1998).

3.4.6 Polje

Noch deutlich größere Hohlformen mit Dimensionen von etwa 1 km² bis einigen 100 km² Fläche sind Poljen, was übersetzt aus dem Serbokroatischen „Feld“ bedeutet. Diese charakteristischen Hohlformen, die ihre Typuslokalität im mediterranen Raum haben, sind durch eine meist flache Ebene aus nicht-verkarstungsfähigem Gestein oder alluvialem Sediment gekennzeichnet, welche an den Grenzen an verkarstungsfähige Gesteine schließt und eine klare Geländekante bilden. Der Boden dieser Hohlform kann sich auf Höhe des Karstwasserspiegels befinden und wird charakteristischerweise von einem Oberflächenentwässerungsnetz durchzogen, an dessen Beginn ein oder mehrere Karstquellen liegen. Über Ponore wird das Oberflächengewässer wieder in den Karst eingeleitet. Bei erhöhtem Wasserangebot, etwa aufgrund starker Niederschläge oder Schneeschmelze, kann es zur Überlastung der Kapazität der Ponore kommen, wodurch es zu einem Rückstau und zur Überflutung im Polje kommen kann. Dies nährt die Böden und erklärt, warum Poljen seit langem als geeignetes fruchtbare Ackerbauland in der sonst meist unfruchtbaren Landschaft des Dinarischen Karsts gelten. Es ist umstritten, ob die poljenähnlichen, kleineren Formen in den Ostalpen als Poljen bezeichnet werden sollten. Diese Großformen im alpinen Bereich haben oftmals auch glaziale Erosion erfahren, weshalb sie genau genommen nicht als reine Karstformen, sondern polygenetische Formen anzusprechen sind (Plan 2016). In dieser Arbeit werden diese Hohlformen dennoch als Poljen bezeichnet.

Von Ford und Williams (1989) werden drei Arten von Poljen differenziert (Abb. 4). Bei „border polje“ wird allochthones, nicht-verkarstungsfähiges Lockermaterial eingeschwemmt, das den Boden abdichtet. Dadurch wird das Gerinne länger an der Oberfläche gehalten und der Großteil des Wassers tritt erst am steilen Begrenzungshang in das Karstsystem ein.

Die prominenteste Form stellen die „structural polje“ dar, welche sich in speziellen tektonischen Settings ausprägen. Oftmals liegen diese Hohlformen, strukturgeologisch gesehen, im Kern übergeordneter Falten / Synkinalen oder Störungen, wodurch relative Wasserstauer, wie etwa Dolomite oder Mergel, im Zentrum des Poljes auftreten und dort als Aquitarde fungieren. Dadurch wird der Wasserfluss an der Oberfläche gehalten und erst am Kontakt zu verkarstungsfähigem Gestein kommt es zur Bildung von Ponoren (Ford und Williams 1989).

Bei „baselevel polje“ liegt der Boden nahe des Niveaus des Karstwasserspiegels. Es handelt sich dabei um die reinste Form von Poljen, da sie in reinem, verkarstungsfähigem Gestein, einer völlig autochthonen Umgebung, entstehen. Denudation der Oberfläche über einen langen Zeitraum führt zur Absenkung des Poljenbodens auf Höhe des Karstwasserspiegels, wodurch sich die Richtung des Wasserflussregimes zu vorzugsweise horizontal verändert und dadurch die Erweiterung des „Fensters“ beschleunigt wird (Ford und Williams 1989).

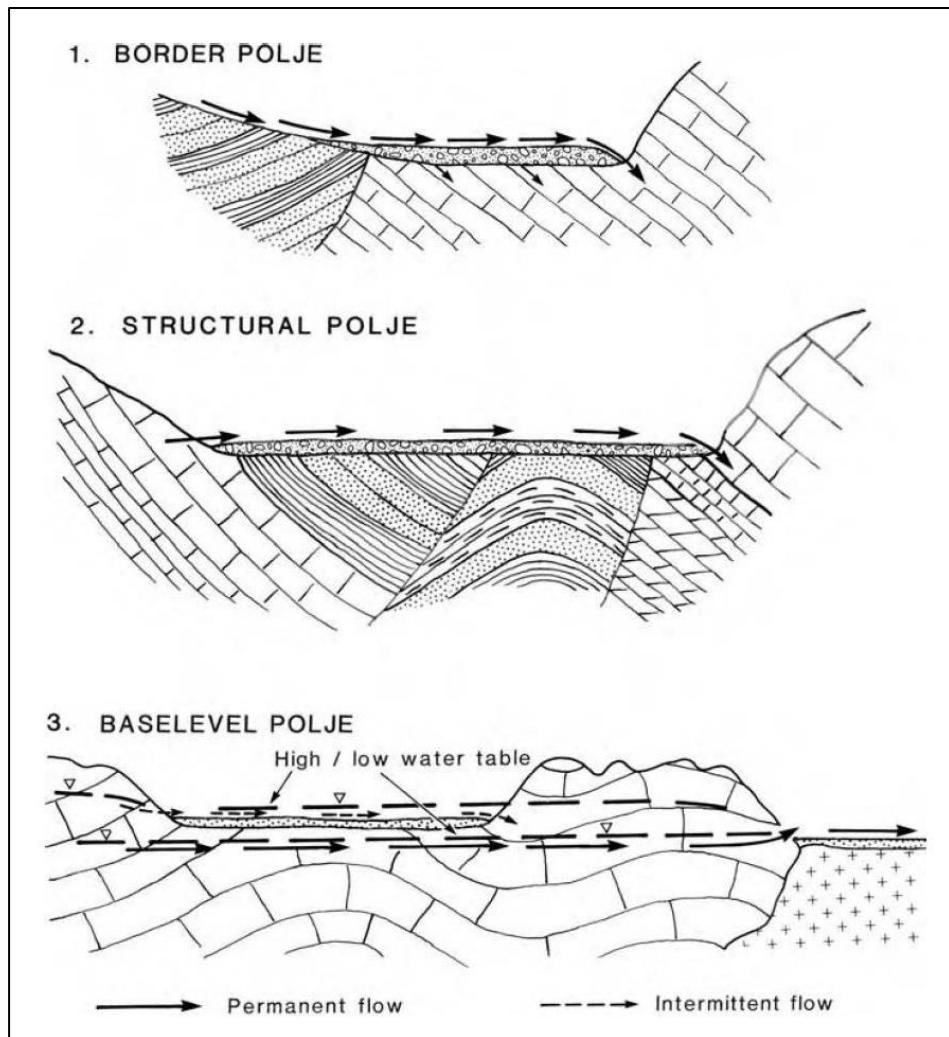


Abbildung 4: Skizzenhafte Erläuterung der drei Arten von Poljen (Ford und Williams 1989).

3.4.7 Karstwannen und Karstmulden

Eine Reihe regional verwendeter Begriffe taucht in vereinzelten Publikationen und Karten auf. So beschreibt Fink (1973) Karstwannen als geschlossene schüsselförmige Karsthohlformen, die größer als Dolinen sind, mit einem meist flachen, durch toniges Material abgedichteten, Boden, welcher sich durch einen scharfen Knick von den Seitenflanken abhebt. Entlang dieser Geländekante können kleine Dolinen beobachtet werden.

Pfeffer (2010) hingegen beschreibt Karstwannen als etwa Quadratkilometer große Senken ohne oberflächlichen Abfluss. Die Wannen sind relativ flach in die Landschaft eingetieft, zeigen in vielen Fällen einen ebenen Aufschüttungsboden und entwässern über die zahlreichen Dolinen.

Als Karstmulden werden laut Fink (1973) große geschlossene Hohlformen beschrieben, die aufgrund der Durchlöcherung durch Dolinen einen unregelmäßigen Boden aufweisen.

3.4.8 Karren

Ein weiteres typisches Merkmal von Verkarstung sind Karren, welche die kleinsten, zentimeter- bis metergroßen, Lösungsformen darstellen, gleichzeitig aber auch die primär ausgeprägten Karstformen

darstellen, aus denen sich in Folge weiterer Korrosion größere Hohlformen bilden können (Veress 2019).

Bögli (1960) klassifiziert Karren grundlegend hinsichtlich der Benetzungsweise sowie der Abflussbedingungen des korrodierenden Wassers. Bei freiem, ungehindertem Abfluss über nackte Kalkflächen entstehen Formen mit teils scharfen Kanten, die nackten Karrenformen. Karren, welche sich unter geschlossenen Bodendecken entwickeln, werden bedeckte Karren genannt. Diese entstehen dadurch, dass das durch den Boden fließende Wasser, gemessen am Luft-CO₂, übersättigt ist und die Korrosion daher stärker ist. Diese Karren weisen viel rundere und glattere Flächen auf.

Die genetische Differenzierung der Karren wird auch von Fink (1969) angewandt, jedoch unterscheidet dieser freiliegend gebildete und subkutane (=bedeckte) Karren. Diese Terminologie wird im Zuge dieser Arbeit verwendet.

Grundsätzlich unterscheiden sich subkutane und freiliegende Karren in ihrer Entstehung und Charakteristik in mehreren Punkten. Da das Regenwasser bei Letzteren an der Oberfläche schnell in Richtung der größten Neigung abtransportiert wird, wird das Gestein nur für kurze Zeit korrosiv beansprucht, während der Wasserfluss im Boden länger dauert und somit die Lösungszeit subkutaner Formen länger ist (Veress 2019). Außerdem führt die vermehrte Kohlendioxid Lösung aus dem Boden zu vermehrter Karstdenudation (Plan 2005a). Auf freiliegenden Flächen überwiegen die linearen, in Abflussrichtung orientierten Karrenformen. Die Lösungsformen des nackten Karsts werden primär geprägt durch die Abflussrichtung, wohingegen sich Karstformen unter Bodenbedeckung entlang struktureller Diskontinuitäten (z.B. Störungen, Klüfte, Fossilien und Schichtflächen) bilden (Veress 2019).

Veress (2010) unterscheidet, ob Karren Wasser nur abführen oder zur Versickerung bringen. Er klassifiziert Rillen-, Rinnen-, Rund-, Mäander-, Wand-, Hohl- und Rippelkarren als abflussdominierte Karren. Weitere Formen stellen Kamenicas, Schichtfugen-, Tritt-, Kluft- und Strukturkarren (Abb. 5) dar, welche durch versickernde oder stehende Wässer entstehen. Erhöhte Hangneigungen sowie erhöhte Löslichkeit des Gesteins, etwa bei Gips, Steinsalz und reinem Kalkstein, führen tendenziell zur Ausbildung abflussdominierter Karrenformen, beispielsweise Rillen- und Wandkarren. Außerdem kann beobachtet werden, dass mit steigender Neigung auf Kalksteinflächen zwar die Dichte der Karrenformen zunimmt, die Karren jedoch an Größe, Varietät und Komplexität abnehmen. Im Gegensatz dazu führt flachere Hangneigung und/oder schlechter lösliches Gestein eher zu Versickerungsformen von Karren (Veress 2019).

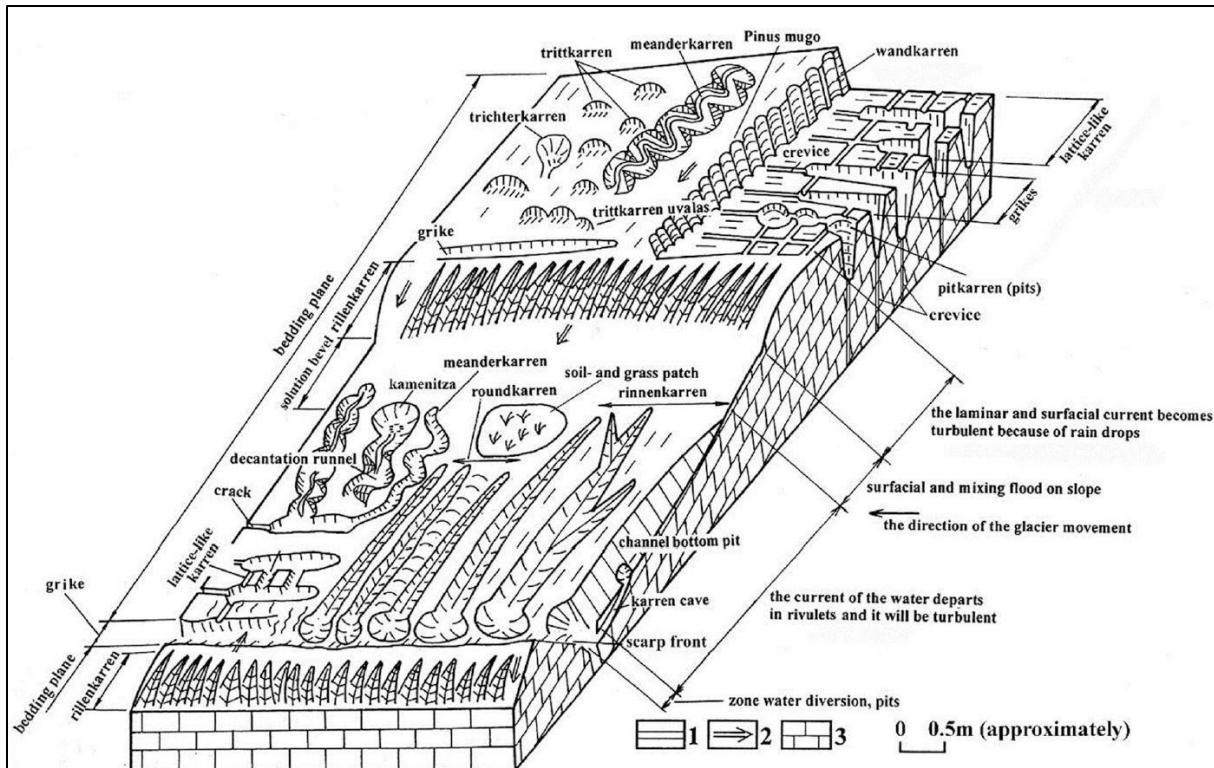


Abbildung 5: Unterschiedliche Karrenformen (Veress 2019).

3.5. Karsttypen

3.5.1 Schichttreppenkarst

Der Begriff Schichttreppenkarst führt etwas in die Irre, da die charakteristischen Rippen durch glazialen Abtrag und nicht primär durch Lösung freigelegt wurden, weshalb diese nicht als karstmorphologische Strukturen bezeichnet werden sollten. Die Schichttreppen wurden nach der letzten Eiszeit (Würm) freigelegt und werden seither durch Karstprozesse überprägt (Plan 2016). Ein gutes Beispiel in NÖ stellen die von Karrenfeldern übersäten Schichttreppen am Dürrenstein-Plateau dar.

3.5.2 Kontaktkarst

Wo verkarstungsfähige Lithologien an nicht-verkarstungsfähiges Gestein grenzen, kann ein weiteres Grenzflächen-Phänomen, der Kontaktkarst, beobachtet werden. Vor allem, wenn das nicht lösliche Gestein das Einzugsgebiet darstellt, trifft eine große Menge an Calcit-ungesättigtem Wasser auf den Kalk. Es kommt zu einer Steigerung der Intensität der Verkarstung, weshalb zum Teil die Ausbildung einer Vielzahl an Ponoren entlang der Gesteinsgrenze beobachtet werden kann (Kranjc 2001; Plan 2003).

4. Methodik

4.1. Daten

Ziel des NÖ-Karst-Projektes ist die Erstellung einer digitalen Karte für das Land NÖ, in die möglichst alle Oberflächenkarstformen aus sämtlichen Karstverbreitungs- und Karstgefährdungskarten, diversen Publikationen und beigefügten Kartenbeilagen sowie unpublizierte Kartierungsergebnisse übernommen werden sollten. Es bedurfte einer umfangreichen Recherche, diese Daten zu erheben, zusammenzuführen und die diversen Terminologien zu vereinheitlichen (Plan et al. 2019). Diese Zusammenführung erfolgte im Programm ArcGIS.

Die in den Kapiteln 3.4.4. und 3.4.7. beschriebenen Begriffe Uvala sowie Karstwanne und Karstmulde seien an dieser Stelle zu erwähnen, da sie im Zuge dieser Arbeit nicht als eigene Typen von Oberflächenhohlformen differenziert werden, sondern als Dolinen klassifiziert werden. Die vereinheitlichten Daten wurden anschließend in einem GIS-Projekt zusammengeführt, wobei 1:25.000 als Zielmaßstab für die Karte gewählt wurde.

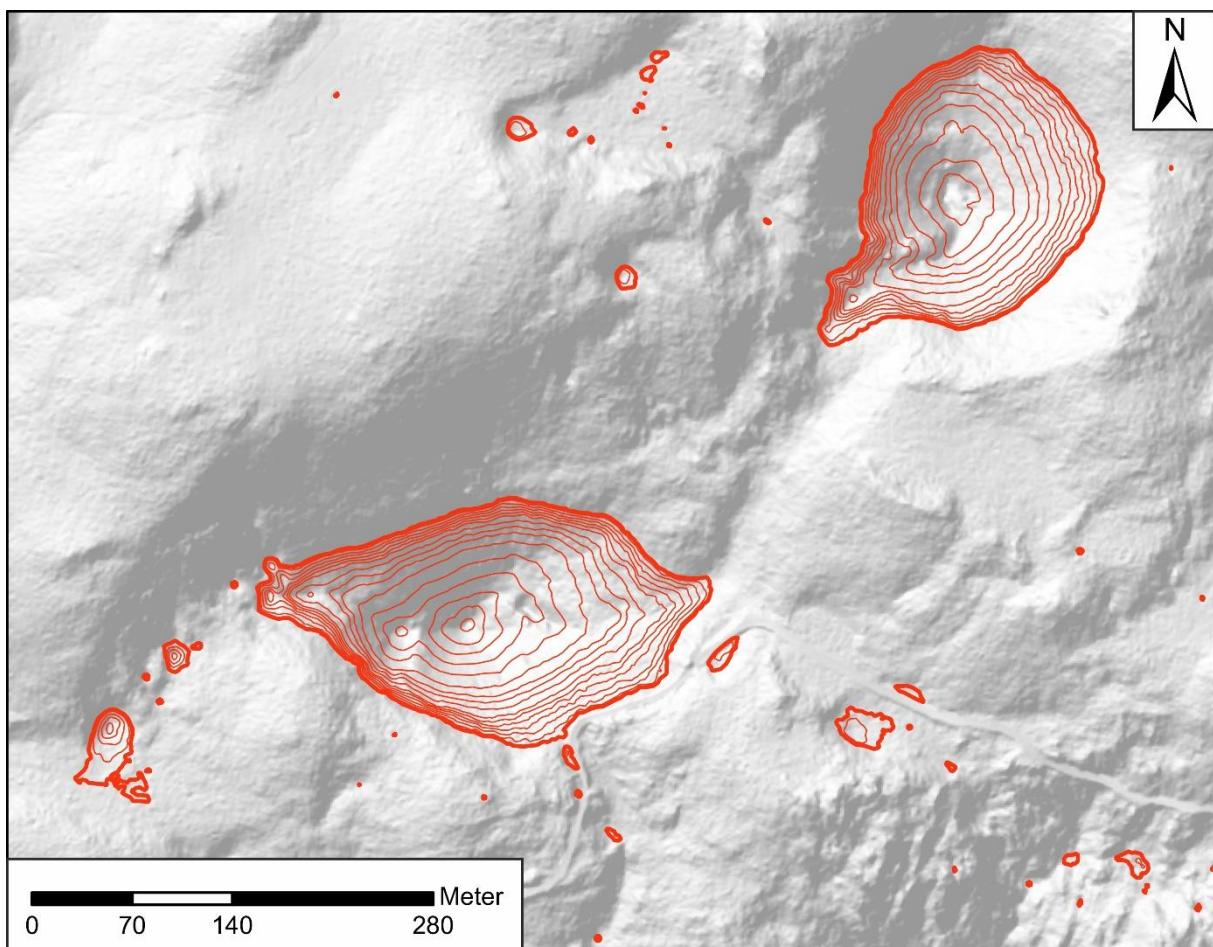


Abbildung 6: Kartenausschnitt aus ArcGIS mit 1-m-Höhenschichtlinien der Sinks (in rot), wobei die äußerste Begrenzung bei 0,2m liegt, einiger Karsthohlformen am Kuhschneeberg.

Für die Vereinheitlichung wurde eine Generallegende mit den Kriterien für die Kartierung und Attribuierung der Karstformen erstellt. Das mittels Airborne Laser Scanning (ALS) generierte Geländemodell mit einer Auflösung von 1 m wurde zur Berechnung von Hohlformen verwendet, wobei der Fill-Sink-Algorithmus angewandt wurde. Davon wurde ein Shapefile abgeleitet, dem

Höhenschichtlinien, beginnend mit 0,2 m Tiefe und 1-m-Höhenintervall, zu entnehmen sind, welche Hohlformen darstellen, die in weiterer Folge als „Sinks“ bezeichnet werden (Abb. 6). Sämtliche nicht eindeutig auf Karstprozesse zurückzuführende, sondern etwa anthropogen entstandene Formen wurden anschließend aus dem Datensatz entfernt. Die dadurch erhaltene Datengrundlage wurde herangezogen, um gezielte Geländebegehungen durchzuführen, welche der Verifizierung bestehender Karstformen sowie der Erweiterung des Datensatzes dienten (Plan et al. 2019).

Im Zuge der Geländearbeit wurden Hohlformen punktuell überprüft oder hinzugefügt, jedoch stammt, wie in Tabelle 1 festgehalten, der Großteil der im Untersuchungsgebiet kartierten Karstformen nicht aus der Geländearbeit dieser Arbeit, sondern aus den jeweils besten zur Verfügung stehenden Kartierungen (publizierte Karten und diverse Manuskriptkarten).

Tabelle 1: Ursprung der analysierten Dolinen. Aufgrund des Zielmaßstabs wurden Dolinen mit Durchmessern kleiner 25 m als Punkte, Karsthohlformen mit Durchmessern größer gleich 25 m als Polygone erfasst. Verwendete Abkürzungen: KGK ... Karstgefährdungskarte; GK ... Geologische Karte; Dol. ... Dolinen; Hf. ... Hohlformen

Quelle	Dol. < 25 m	Hf. ≥ 25 m
Im Zuge dieser Masterarbeit mittels ALS berechnete und mittels Fernerkundung verifizierte Hohlformen	10.462	261
Geländekartierung im Zuge dieser Masterarbeit	173	132
NÖ-Karst-Projekt (Plan et al. 2019)	1.949	246
Der Dürrenstein (Fink 1973)	293	106
Färbeversuch am Schlagerbodenpolje (Fink 1965)	1	2
Karstmorphologische und -hydrologische Beobachtungen in den Göstlinger Alpen (Nagl 1970)	70	14
GK 58 - Baden (Schnabel 1998)	8	0
GK 71 - Ybbsitz (Ruttner und Schnabel 1988)	54	8
GK 72 - Mariazell (Bauer und Schnabel 1997)	19	13
Die Höhlen Niederösterreichs Band 1-5 (Hartmann und Hartmann 1979-2000)	36	4
Projekt Hydro Ybbs West (Plan 2005b)	115	48
KGK 4329 - Wilhelmsburg (Fink 2011)	12	0
KGK 70 - Waidhofen/Ybbs (Pavuza und Traindl 1984)	22	1
KGK 72 - Mariazell (Fink 2007)	89	26
KGK 73 - Türnitz (Fink 1999)	42	16
KGK Rax - Schneeberg (Fink et al. 2005)	10	0
Karstkartierung für Wiener Wasser (Plan et al. 2007)	1.187	159
unpublizierte Kartierungsergebnisse Plan	209	19
Masterarbeit (Schober 2014)	1	0
Markierungsversuch Ursula Quelle (Völk 1987)	2	0
Masterarbeit (Seidl 2012)	0	4
Gesamt	14.754	1.059

Alle im Untersuchungsgebiet kartierten Karstformen sind in Tabelle 1 enthalten. Einige davon wurden im Zuge des Projektes als irrelevant befunden und in Folge dessen aus dem finalen Datensatz (Tab. 6) entfernt. Die in der Masterarbeit von Winkler (2019) kartierten Gipskarstformen sind im Datensatz des NÖ-Karst-Projektes (Plan et al. 2019) enthalten.

4.2. Geländekartierung

Zwischen April und September 2020 wurden Kartierungen von Oberflächenkarstformen durchgeführt. Da im Zuge des NÖ-Karst-Projektes (Plan et al. 2019) viele Gebiete mittels Geländekartierung in den Jahren zuvor bereits aufgenommen wurden, zielte die vorliegende Arbeit auf Gebiete, wie das nördliche Hochkar, einen Teil des Dürrensteins oder die Region um Puchenstuben ab, aus denen bisher keine oder wenige Sinks verifiziert wurden.

Die Datenerhebung erfolgte elektronisch am Tablet mittels der Android-App Locus GIS. Die erhobenen Karstformen wurden mit dem integrierten Global Positioning System (GPS) lokalisiert und klassifiziert. Je Karstform wurden Shapefiles mit Punkt- oder Polygon-Features angelegt, in denen die beobachteten Karstformen abgespeichert wurden. Zudem wurden Attribute, wie etwa Tiefe, mögliche Tümpel, Ponore sowie sonstige Anmerkungen der aufgenommenen Formen notiert. Als Orientierungshilfe im Gelände dienten neben dem GPS, die Österreichische Karte 1:50.000 (ÖK 50) vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (o.J.) sowie ein vom ALS generiertes, schattiertes und digitales Geländemodell.

4.2.1 Im Zuge dieser Arbeit kartierte Karstformen

Im Zuge dieser Arbeit wurden 163 Dolinen mit Durchmessern < 25 m kartiert, wovon 47 als mögliche Dolinen, 19 als mögliche Gipsdolinen, zwölf als Gipsdolinen, neun als Ponordolinen und 76 als Dolinen klassifiziert wurden. Des Weiteren wurden 132 Dolinen mit Durchmessern ≥ 25 m aufgenommen, wovon 16 als mögliche Dolinen, 13 als Gipsdolinen und 103 als Dolinen klassifiziert wurden. Außerdem wurden eine Glaziokarst-Hohlform, 13 Ponore und 87 Karrenvorkommen im Gelände kartiert (Abb. 7).

Neben den im Gelände aufgenommenen Karstformen wurde eine Vielzahl an solchen auch digital anhand von Fernerkundung und den Vergleichswerten aus den Geländebegehungen kartiert. Die mittels der ArcGIS-Algorithmen berechneten Sinks wurden mittels Fernerkundung überprüft. Die Einteilung dieser Hohlformen erfolgte unter Berücksichtigung der Morphologie der Umgebung, des Orthofotos, der geologischen Karten sowie der Profilschnitte durch die Hohlformen, um potentielle Wälle von Bombentrichtern ausschließen zu können. Auf dieser Grundlage wurden die Karsthohlformen in 10.268 Dolinen mit Durchmessern < 25 m, 250 Karsthohlformen mit Durchmessern ≥ 25 m und neun Ponore eingeteilt.

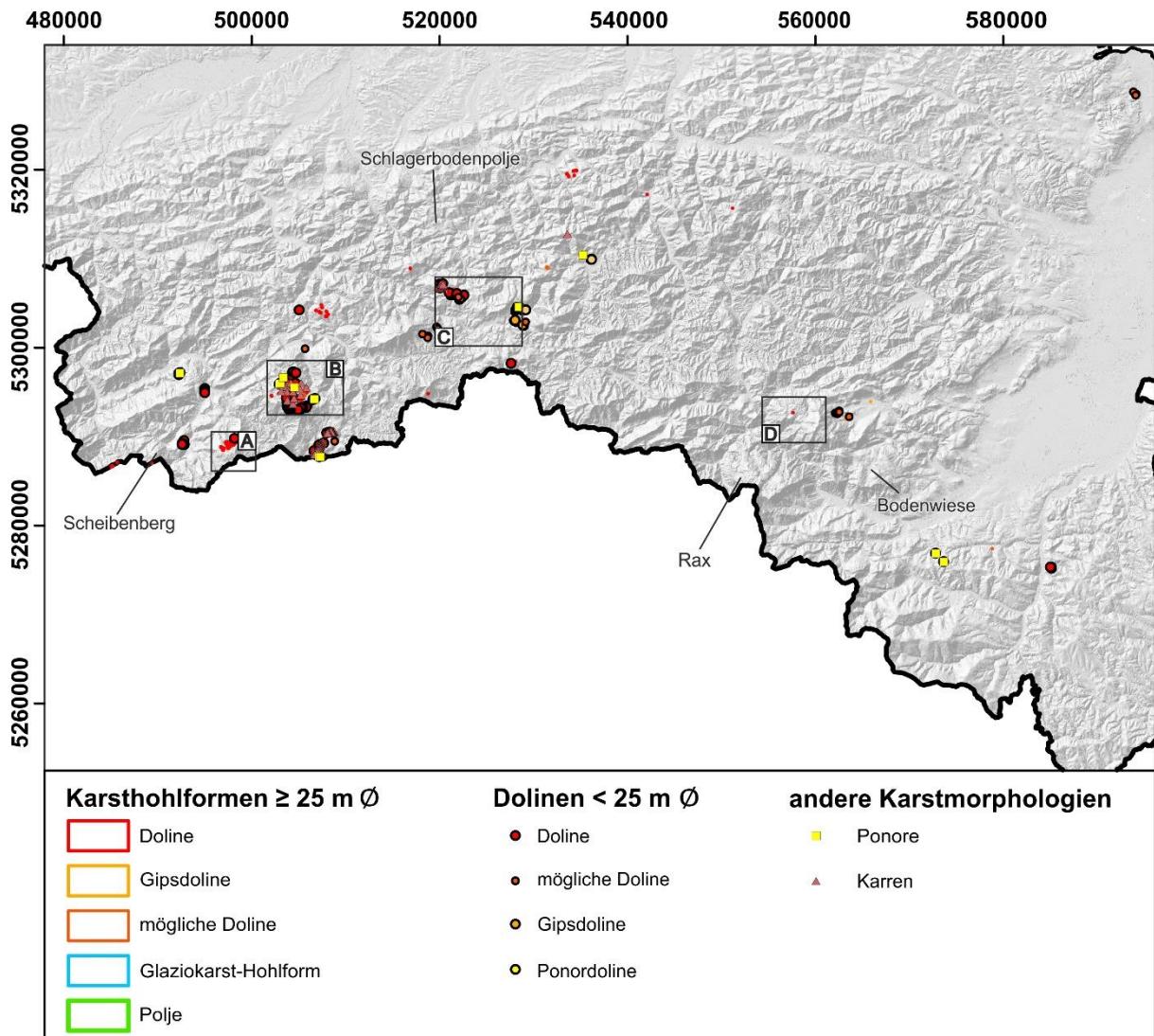


Abbildung 7: Karstmorphologische Karte des alpinen Raums Niederösterreichs mit den im Zuge dieser Arbeit kartierten Karstformen. Die wichtigsten Gebiete und großen Karstformen sind erwähnt. A) Hochkar-Plateau; B) Dürrenstein-Plateau; C) Gebiet um Puchenstuben bis Annaberg; D) Schneeberg-Plateau. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: schattiertes ALS-Geländemodell.

4.3. Aufbereitung der digitalisierten Daten mit ArcGIS

Die Anzahl der Sinks, welche ohne Verifizierung im Gelände aufgrund von Fernerkundung als Karstformen klassifiziert wurden, liegt bei 10.518 Dolinen und ist somit um ein Vielfaches höher als die im Gelände kartierten Formen. Außerdem wurden neun Ponore lediglich anhand des ALS aufgenommen. Im Zuge der Arbeit wurde berücksichtigt, dass manche Dolinen im Gelände nicht eindeutig als Karstformen verifiziert werden konnten, weshalb diese mit einem „?“ attribuiert wurden, um festzuhalten, dass diese als fragliche Karstformen gelten. Zudem wurde eine Vielzahl an Sinks ebenfalls mit einem „?“ attribuiert, da manche dieser ebenfalls nicht sicher als Karstform bestimmt wurden.

4.3.1 Datengrundlage zu Beginn der Arbeit

Die bereits im Zuge des NÖ-Karst-Projektes digitalisierten, publizierten und unpublizierten Quellen stellten die Ausgangslage dieser Arbeit dar (Tab. 1). Die Lagegenauigkeit der Karstformen älterer Karstgefährdungskarten oder Publikationen ist aufgrund der damals angewandten Lokalisierungsmethoden nicht überall gewährleistet. Deshalb mussten einzelne Dolinen mittels Sinks räumlich angepasst werden.

4.3.2 Zusammenführen aller Datenquellen und Erstellen verschiedener Shapefiles

Das Hauptaugenmerk galt der Vereinheitlichung des Maßstabes sowie der vereinheitlichten Klassifizierung der diversen Karstformen. Besonders wichtig beim Zusammenführen der unterschiedlichen darzustellenden Karstformen aus den verschiedenen Quellkarten ist die Übereinstimmung deren Projektionen. Andernfalls kann nicht gewährleistet werden, dass sich die Features nicht zueinander verschieben oder in sich verzerren. Da ein Großteil der Datengrundlage in dieser vorlag, wurde die Projektion WGS1984 UTM Zone 33N als Standard festgesetzt. Jene Shapefiles, welche ursprünglich in unterschiedlichen Projektionen dargestellt wurden, konnten mittels der Funktion „Projekt“ umprojiziert werden. Die Funktion „Merge“ wurde zum Zusammenfügen mehrerer Shapefiles angewandt, wobei neben der einheitlichen Projektion auch eine angepasste Attributabelle gewährleistet sein sollte.

Die dominante, auf Karstprozesse rückführbare und das Landschaftsbild prägende Oberflächenkarstform in NÖ sind Dolinen. Jedoch wurden, um ein ganzheitliches Bild der Morphologie und räumlichen Verteilung der Karstformen in NÖ zu bekommen, weitere Karstformen in die digitale Karte eingearbeitet. Alle gleichen Karstformen aus den diversen Quellkarten wurden, wie aus Tabelle 2 ablesbar, in die verschiedenen Shapefile-Typen zusammengeführt.

Tabelle 2: Zusammengeführte Shapefiles unterschiedlicher Karstformen und deren Shapefile-Typ.

Name	Shapefile Typ
Dolinen	Punkt und Polygon
Karren	Punkt
Ponore	Punkt
Poljen	Polygon
Glaziokarst-Hohlformen	Polygon

4.3.3 Aufbereitung der Grunddaten

Da im Zuge des NÖ-Karst-Projektes (Plan et al. 2019) teilweise Multipart-Polygone kartiert wurden, mussten die Shapefiles mit der Funktion „Multipart to Singlepart“ umgewandelt werden, sodass in weiterer Folge jedes Polygon und jeder Punkt als einzelnes Feature vorliegt. Manche Features wurden in diversen Karten oder Publikationen unterschiedlich aufgenommen, zudem kam es auch vor, dass sie nicht mit den berechneten Hohlformen übereinstimmten. Deshalb wurde der gesamte Datensatz, der Übersichtlichkeit wegen in nachstehende Shapefiles unterteilt (Tab. 3) und auf Duplikate geprüft.

Auf Grund des Zielmaßstabes von 1:25.000 wären Dolinen mit Durchmessern < 25 m (was 1 mm in der Karte entspricht) kaum als Polygon sichtbar, weshalb 25 m als Grenzwert bestimmt wurde. Da es zur

Eruierung der Durchmesser keine adäquate Methode gab, wurde entschieden, die Fläche heranzuziehen, um die Dolinen in jene größer und jene kleiner des bestimmten Grenzwertes zu unterteilen. Somit wurde unter Annahme der Kreisform von Dolinen die Kreisformel angewandt, woraus sich der Grenzwert für die Fläche von 490 m^2 ergab. Die Karsthohlformen mit Flächen $< 490 \text{ m}^2$ wurden somit dem Punkt-Shapefile „Punkte“, jene mit Flächen $\geq 490 \text{ m}^2$ dem Polygon-Shapefile „Hohlformen“ zugeordnet.

Tabelle 3: Erklärung der wichtigsten im Gelände unterschiedenen Shapefiles.

Shapefile	Enthaltene Daten
Nichts	Formen, die nach dem Geländebeobachtung nicht auf Karstprozesse zurückzuführen sind
Punkte	Dolinen mit einem Durchmesser $\leq 25 \text{ m}$ (entspricht $\leq 490 \text{ m}^2$)
Hohlformen	Dolinen, Glaziokarst-Hohlformen und/oder Poljen mit einem Durchmesser $\geq 25 \text{ m}$ (entspricht $\geq 490 \text{ m}^2$)
Sinks	Mittels ALS Geländemodell kalkulierte und fernerkundungsgeprüfte Karsthohlformen
Karren	Im Gelände kartierte Karren
Ponore	Ponore

Um Veränderungen an der Geometrie oder den Eigenschaften einzelner Features vorzunehmen, wurde das Werkzeug „Start Editing“ verwendet. So konnten Form, Position oder Attribute wie Tiefe, ausgewählter Karstformen angepasst werden. Weitere wichtige Werkzeuge waren „Add field“, womit die Attributabelle um eine Spalte erweitert wurde, „Calculate geometry“ wenn etwa die Fläche eines Polygons ermittelt wurde, und „Field calculator“, mit Hilfe dessen beliebig vielen Features bestimmte Werte (Zahl, Rechenoperation oder Text) zugeordnet wurden.

Um aus größeren Shapefiles ausgewählte Features zu extrahieren, wurden diese ausgewählt und anschließend mit der Funktion „Export Data“ in neuen Shapefiles abgespeichert. Als Alternative zur händischen Auswahl wurde, sofern die Lage der Features für die Auswahl grundlegend erschien, die Funktion „Select by location“ angewandt.

Am schattierten ALS Geländemodell ließen sich Massenbewegungen meist gut erkennen. Die, in jenen Gebieten kartierten Hohlformen und Sinks konnten zum Großteil entfernt werden. Lediglich stark ausgeprägte trichterförmige Geländevertiefungen wurden im Datensatz behalten, da diese möglicherweise auf Gipskarst hinweisen, sofern dies in Abgleich mit der geologischen Karte plausibel erschien.

Anhand des ALS wurde, wie bereits erwähnt, eine Kalkulation angestellt, welche die markanten oberflächlichen Sinks feststellte und in Form von Höhenschichtlinien darstellt. Diese Polylinien wurden mit der Funktion „Polyline to Polygone“ zu Polygonen umgewandelt, wobei jeweils die Isohypse mit der geringsten Tiefe von $0,2 \text{ m}$ die äußere Begrenzung darstellt. Anschließend wurde die Funktion „zonal statistic“ verwendet, um einen Rasterdatensatz zu erstellen, mit Hilfe dessen die maximale Tiefe der Hohlformen eruiert und anschließend den äußeren Begrenzungen zugeordnet werden konnte.

4.3.4 Überprüfung der einzelnen Features

Bei einigen im Gelände überprüften Sinks wurde festgestellt, dass sie nicht durch Karstprozesse entstanden sind, weshalb diese Karsthohlformen aus dem Shapefile entfernt wurden. Auch die im Originaldatensatz enthaltenen Features, welche in der Steiermark liegen und somit keine Relevanz für diese Arbeit haben, wurden gelöscht.

Aufgrund der Vielzahl an Datenquellen wurde stets parallel an mehreren Shapefiles gearbeitet (Sinks, selbst kartierte Dolinen, Dolinen aus älteren Karten, etc.), weshalb zum Schluss überprüft werden musste, dass sich keine Dolinen überschneiden oder doppelt vorlagen. Daher wurden mittels „Select by location“ und „Features of target layer are within source layer“ unter Verwendung eines Suchradius von 20 m alle Polygone der Sinks ausfindig gemacht und gelöscht, welche innerhalb dieses Umkreises vollständig oder teilweise mit kartierten Dolinen überlappten. Die weitere Auswahl zu entfernender Karstformen erfolgte händisch, wobei im Falle von Überlappungen stets jene Features entfernt wurden, welche nicht mittels eigener oder im Zuge des NÖ-Karst-Projektes durchgeföhrter Geländekartierung aufgenommen wurden. Danach wurden alle Features mittels „Merge“ in einem Shapefile zusammengeführt. Aufgrund der Geländeerfahrung wurden alle aus Sinks abgeleiteten Dolinen mit Flächen $\leq 4 \text{ m}^2$ als irrelevant erachtet und daher entfernt.

Der Vergleich im Gelände zwischen kartierten Dolinen und Sinks zeigte, dass Letztere tendenziell zu klein bemessen waren. Daher wurden diese mit der Funktion „Buffer“ um 2 m in alle Richtungen vergrößert. Anschließend wurden die eckigen, unnatürlich wirkenden Polygone mit „Smooth Polygon“ abgerundet. Den im Gelände kartierten Punkten (Dolinen $< 25 \text{ m}$), welchen die Angabe über die Fläche fehlte, wurde diese mittels „spatial joins“ der Außenbegrenzungen der Sinks beigefügt.

Nachdem die Sinks verifiziert, bereinigt und vollständig attribuiert waren, wurden sie zwei Shapefiles zugeteilt. Das Punkt-Shapefile „Sinks_Dolinen“ sollte alle Dolinen mit Durchmessern $< 25 \text{ m}$, das Polygon-Shapefile „Sinks_Hohlformen“ alle Karsthohlformen mit Durchmessern $\geq 25 \text{ m}$ enthalten.

Die im Gelände kartierten Ponore wurden anschließend, mit den im Zuge des NÖ-Karst-Projektes aufgenommenen Ponoren, in einem Shapefile vereint.

Es wurde festgestellt, dass die im Gelände ermittelten Tiefen von Dolinen in der Regel etwas größer sind als die kalkulierten Werte der Sinks. Ein durchschnittlicher Faktor von 1,5 wurde empirisch ermittelt, weshalb die kalkulierten Werte der Sinks mit diesem Faktor multipliziert und angepasst wurden, wobei auf ganze Meter gerundet wurde.

Aufgrund des Zielmaßstabes von 1:25.000 und der Lesbarkeit der Karte, die gewährleistet werden sollte, hat der Mindestabstand zwischen zwei Karrenvorkommen in der Karte mindestens 75 m zu betragen. Daher wurde das Shapefile „Karren“ auf die nötigen Abstände zwischen den Signaturen überprüft und gegebenenfalls angepasst.

4.3.5 Vereinheitlichung und Zusammenfassung der lithologischen Einheiten

Um eine semiquantitative Abschätzung über die Verkarstungseigenschaften unterschiedlicher Lithologien treffen zu können, musste eine vereinheitlichte digitale geologische Karte NÖs erstellt werden. Diese digitale geologische Kartengrundlage beruht auf einem Polygondatensatz, den die Geologische Bundesanstalt erstellt hat (Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Geologischer

Dienst 2013). Er basiert auf den jeweils besten zur Verfügung stehenden geologischen Kartierungen (publizierte Karten und diverse Manuskriptkarten), mit Maßstäben zwischen 1:25.000 und 1:75.000.

Auf Basis dieser digitalen Kartengrundlagen wurde eine vereinheitlichte und übersichtliche Karte, in der vor allem die wichtigsten verkarstungsfähigen Lithologien im alpinen Raum NÖs dargestellt sind, erstellt (Abb. 8). Dabei dienten die Erläuterungen von Schnabel et al. (2002) zur Geologischen Karte des Landes NÖ 1:200.000 der Vereinheitlichung als Richtwert. Im Sinne dieser wurden sämtliche stratigraphische Einheiten mit anderen zusammengefügt, sofern sich diese in ihrem karstmorphologischen Verhalten, Ablagerungsmilieu oder Alter glichen oder ähnelten.

Zu Beginn wurden sämtliche Polygone der geologischen Karte entfernt, die anhand der aus der Attributabelle entnommenen Gesteinsinformationen als karstirrelevante Lithologien einzustufen waren. Darunter fallen alle Lithologien, welche keinen Kalkstein, Dolomit, Gips/Anhydrit oder irgendwelche metamorphen oder sonstigen Formen davon darstellen.

Nach dieser primären Einteilung wurde überprüft, ob Polygone fälschlicherweise den nicht-verkarstungsfähigen Lithologien zugeordnet wurden. Dabei wurden Flächen gesucht, auf welchen trotz vermeintlich schlecht verkarstungsfähigen Gesteins viele Oberflächenkarstformen kartiert wurden. Als Beispiel sind vereinzelte, in quartären Sedimenten kartierte Dolinen im unmittelbaren Bereich zum Haselgebirge zu erwähnen, die höchstwahrscheinlich auf Gipskarst im Untergrund zurückzuführen sind.

Die wichtigsten, in der digitalen geologischen Karte NÖs zusammengefassten, verkarstungsfähigen Lithologien sind in Tabelle 4 angeführt, worin zudem die wichtigsten untergeordneten stratigraphischen Einheiten festgehalten sind. Manche Vereinheitlichungen werden an dieser Stelle kurz erklärt. So wurden der Übersicht wegen alle im unteren Karn abgelagerten feinklastischen Sedimentite als Lunzer Schichten klassifiziert. Außerdem wurden sämtliche jurassische Lithologien in die Gesteine der verkarstungsfähigen und der nicht-verkarstungsfähigen Jura im Allgemeinen unterteilt (Anhang Tab. 1). Lediglich die unter- bis mitteljurassische Oberseebrekzie, welche eine spröd deformierte Dachsteinkalk-Scholle darstellt, sowie der Plassenkalk, ein Plattformkarbonat, (Krainer 2016) werden als stratigraphisch separate Einheiten des Jura behandelt.

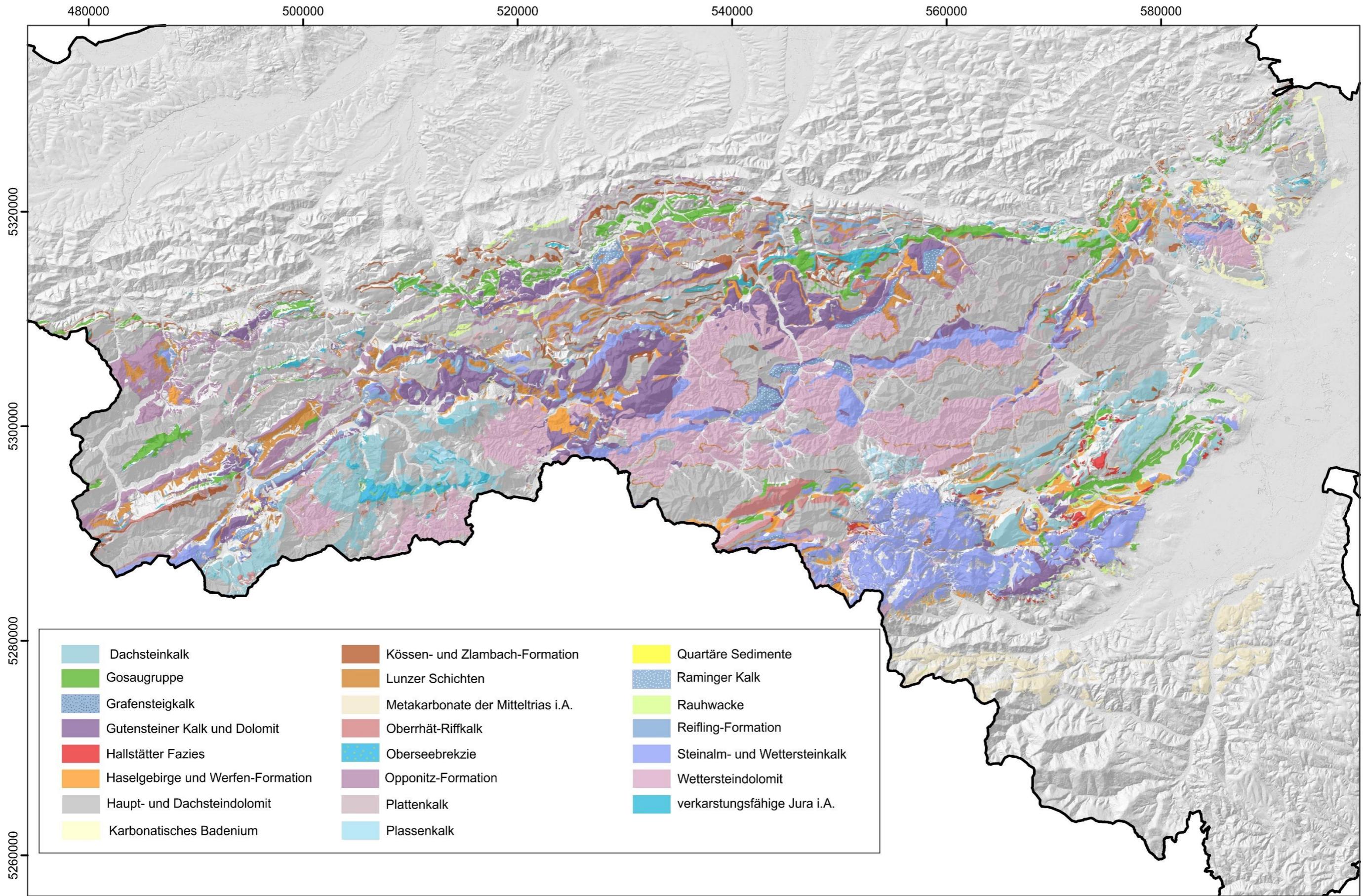


Abbildung 8: Zusammenfassung der wichtigsten Lithologien des alpinen Raum Niederösterreichs. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: schattiertes ALS-Geländemodell.

Tabelle 4: Die Zuteilung untergeordnet auftretender Lithologien zu den definierten Haupteinheiten. Die rot hinterlegten Lithologien wurden bei den statistischen Auswertungen nicht mehr berücksichtigt.

Vereinheitlichte Haupt-Lithologie	weitere zugeordnete Lithologien
Dachsteinkalk	Bärwies-Formation, Tauglboden-Formation, Wandriffkalk (Nor-Sevat)
Gosaugruppe	Alle kretazischen Sedimentgesteine (Kalkmergel, Tonsteine, Sandsteine, Karbonatbrekzien)
Grafensteigkalk	
Gutensteiner Kalk und Dolomit	Annaberger Kalk, Muschelkalk (Mittel-Trias)
Hallstätter Fazies	Pötschenkalk, Pedataschichten
Haselgebirge und Werfen-Formation	
Haupt- und Dachsteindolomit	Dolomitrauhwacke
Karbonatisches Baden	Gainfarner Brekzie, Leithakalk
Kössen- und Zlambach-Formation	Lias-Basiskalk, Schattwald-Formation
Lunzer Schichten	Alle im unteren Karn abgelagerten feinklastischen Sedimentite: Mürztaler Schichten, Raibler Schichten, Trachyceras Schiefer
Metakarbonate der Mitteltrias i.A.	Dünnpflattiger Kalk (Rhät), Dolomitschlierenkalk, Kalk, Bänderkalk bis Kalkmarmor (Anis)
Oberrhät-Riffkalk	
Oberseebrekzie	
Opponitz-Formation	Gelblichgrauer, z.T. dünn geschichteter Kalk und Mergel, Rauhwacke, Brekzie; Karn
Plassenkalk	Tressensteinkalk
Plattenkalk	Puchenstubener Schichten
Raminger Kalk	
Rauhwacke	
Reifling-Formation	
Steinalm- und Wettersteinkalk	
verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Jurakalke (Lias-Malm), Hierlatzkalk, Oberalmer-Formation, Roter Flaserkalk, Vilserkalk
Wettersteindolomit	Ramsaudolomit

Die Gesteine der Gosaugruppe, der Kössen- und Zlambach-Formation sowie jene der Lunzer Schichten wurden aufgrund deren schlechter Verkarstungsfähigkeit im Zuge der statistischen Auswertungen an Dolinen nicht mehr berücksichtigt.

4.3.6 Zuordnung der Karstformen zu den Karstgesteinen

Bei der GIS Verschneidung der Karsthohlformen mit der vereinfachten Lithologie stellte sich heraus, dass 13.749 der insgesamt 15.476 Oberflächenkarstformen vollständig innerhalb einer Lithologie liegen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass etwa 1700 Karsthohlformen keiner karstrelevanten

Gesteinseinheit zugeordnet werden konnten. Großteils sind die ungenauen Grenzen der Geologischen Karte dafür verantwortlich, weshalb weitere Schritte gesetzt wurden, um im Gelände sicher als Dolinen beschriebene Karstformen zuzuordnen. Deshalb wurden alle eindeutig als Gipskarst beschriebenen Dolinen der Lithologie „Haselgebirge und Werfen-Formation“ zugewiesen. Außerdem wurden mittels „Select by location“ Abfrage alle Dolinen ermittelt, welche im Umkreis von 50 m zu Karstgesteinen kartiert wurden, um anschließend den in der geologischen Karte am nächst gelegenen Lithologien zugeordnet zu werden. Die übrigen Hohlformen wurden einzeln überprüft und gegebenenfalls noch Lithologien zugewiesen.

Außerdem wurde das Punkt-Shapefile der Karrenvorkommen mit den zugrundeliegenden Lithologien verschnitten, um eine Aussage über bevorzugte Karrenbildungen auf bestimmten Gesteinen ableiten zu können. Dieselbe Analyse wurde mit dem Punkt-Shapefile der Ponore durchgeführt.

Nach der Zuordnung der Karstformen zu den Karstgesteinen steht ein finaler Datensatz, welcher fünf Poljen, zwölf Glaziokarst-Hohlformen, 15.459 Dolinen, 248 Ponore und 900 Karrenvorkommen enthält.

4.4. Berechnungen mittels GIS-Daten

4.4.1 Verhältnis Tiefe zu Fläche

Um einen möglichst vollständigen Datensatz zu erhalten, wurden alle Karstformen, denen die Information über die Tiefe fehlte, mit den kalkulierten Raster-Polygonen verschnitten, einzeln überprüft und nach Möglichkeit nachgetragen, wobei manche Features unvollständig blieben. Außerdem wurde das Verhältnis zwischen Tiefe und Fläche ermittelt, wodurch allen Features, bei denen einer der beiden Parameter bekannt war, der Unbekannte berechnet und notiert wurde.

Das Verhältnis zwischen den Flächen, beziehungsweise dem Durchmesser einer Doline und deren jeweiliger Tiefe, wurde mit Hilfe von Excel aus einem Datensatz von 12.240 Features berechnet, wobei festzuhalten ist, dass einzelne Dolinen deutlich vom mittleren Verhältnis abweichen. Zur Berechnung des Durchmessers von Polygonen konnte, da von kreisrunden Hohlformen ausgegangen wurde, die Formel für den Kreis zur Ermittlung des Radius verwendet werden.

Für die Berechnung des Verhältnisses Tiefe zu Durchmesser wurden alle Dolinen bis zu einem Durchmesser von 25 m herangezogen. Alle Dolinen mit einer Fläche $< 4 \text{ m}^2$, demnach alle Durchmesser $< 2 \text{ m}$, wurden als irrelevant angesehen und daher nicht berücksichtigt. Der Verteilung der verschiedensten Dolinen (Abb. 9) wurde eine lineare Trendlinie beigefügt, welche durch den Nullpunkt gelegt wurde. Dessen Steigung entspricht der Funktion (3), wobei T die Tiefe der Dolinen, und D den Durchmesser anzeigen. Diese Formel (3) wurde zur Ermittlung der Tiefe angewandt, sofern der Durchmesser der Hohlform bekannt war, sowie auch zur Ermittlung des Durchmessers im umgekehrten Fall.

$$(3) \quad T = 0,31 d$$

Mittels dieser Beziehung konnten 1309 Dolinen, von denen lediglich die Tiefe bekannt war, Durchmesser und Flächen zugeordnet werden. Nach diesem Schritt blieben 418 Dolinen übrig, denen sowohl die Informationen über die Tiefe als auch jene über den Durchmesser fehlten.

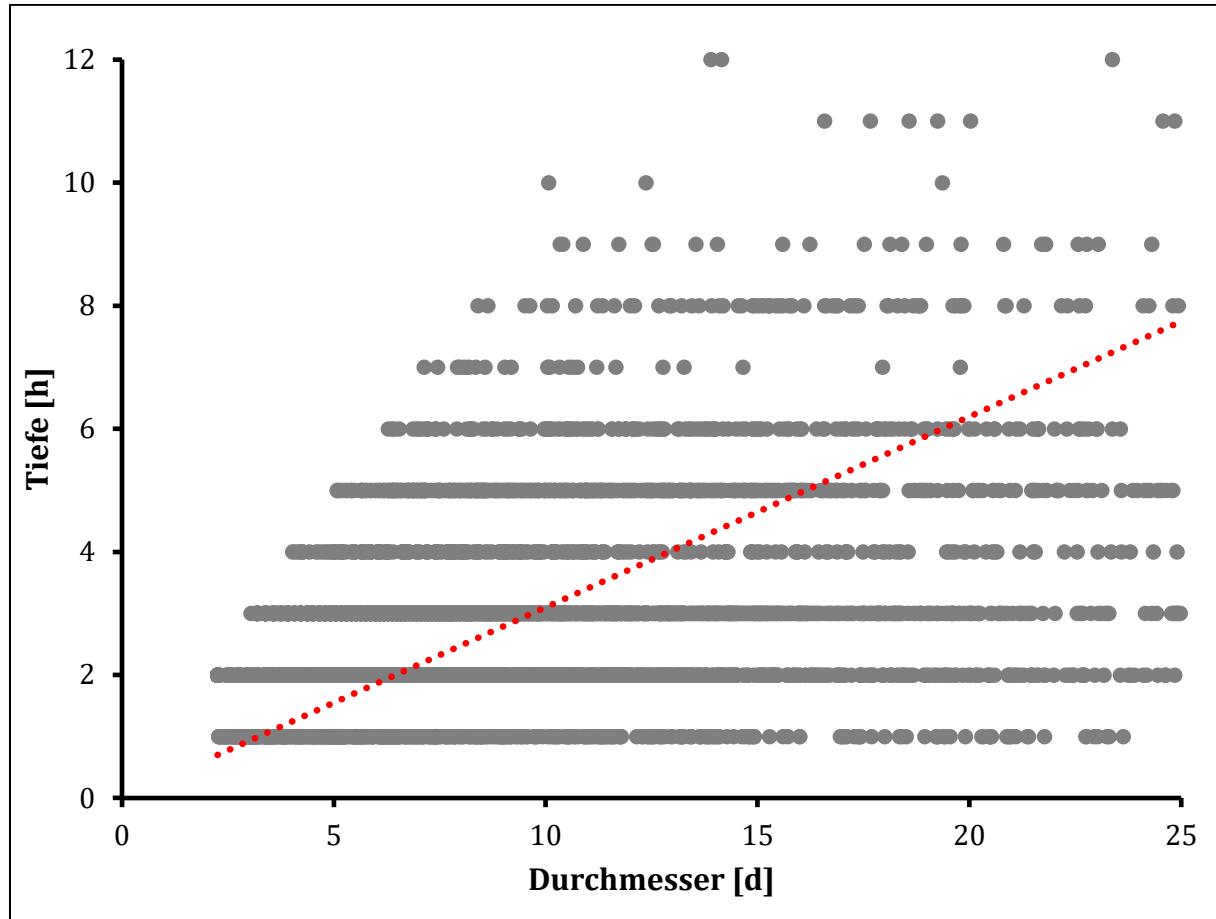


Abbildung 9: Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser aller Dolinen größer 2 m und kleiner gleich 25 m. Mittels linearer Trendlinie wurde die Beziehung zwischen diesen Werten ermittelt.

4.4.2 Volumen

Für die näherungsweise Berechnung des Volumens (V) aus der Fläche (A) und der Tiefe (T) wurde angenommen, dass die Dolinen kegelförmig sind (Plan und Decker 2006). Daraus ergab sich die nachstehende Formel (4):

$$(4) \quad V = A * \frac{T}{3}$$

4.4.3 Dolinendichte (Kernel density)

Zur Darstellung der räumlichen Verteilung von Dolinen eignen sich Punktdichten. Dafür wurde die Funktion „Kernel density“ verwendet, die für einen vorgegebenen Umkreis die Dichte an Features als Raster berechnet (Bauer 2015). Die Dolinendichte wird zumeist in Features / km² angegeben, woraus sich für eine Fläche von 1 km² ein Radius für den Kreis von 564 m ergibt. Um fragliche Dolinen in der Dichtekalkulation zu berücksichtigen, wurden diese um den Faktor 0,5 geringer gewichtet. Neben der

anzahlmäßigen Dichte an Dolinen wurde auch die Dichteverteilung in Bezug auf das Volumen berechnet.

4.4.4 Pitting Index (R_p)

Der Pitting Index stellt eine einfache Möglichkeit zur Ermittlung des Grades der Oberflächenverkarstung dar (Denizman 2003; Bauer 2015). Er wurde mittels Formel (5) berechnet, wobei A_k der Gesamtfläche an Karstgestein und $\sum A_d$ der Gesamtfläche aller Karsthohlformen entspricht. Umso größer der Anteil an Dolinen, Glaziokarst-Hohlformen und Poljen am Landschaftsbild ist, desto näher ist der Wert gleich 1.

$$(5) \quad R_p = \frac{A_k}{\sum A_d}$$

Der Reziprokwert ($1/R_p$) davon beschreibt den prozentualen Anteil der Dolinenflächen in Bezug zur Gesamtfläche.

5. Ergebnisse und Interpretation

Im Folgenden werden Lithologien beschrieben, in denen sich laut stratigraphischer Tabelle (Erläuterungen zur geologischen Karte) NÖs (Schnabel et al. 2002) Karstformen ausbilden könnten. Die Sedimentgesteine der Gosaugruppe enthalten zwar karbonatische Einheiten, aber die Geländebeobachtungen zeigen, dass diese schwach, beziehungsweise nicht verkarstungsfähig sind. Außerdem werden in Kössen- und Zlambach-Formation, welche aus Tonen, Mergeln und tonigem Kalkstein aufgebaut werden, keine Oberflächenkarstformen beobachtet. In den siliziklastischen Lunzer Schichten werden wie in den anderen erwähnten lithologischen Einheiten kaum bis keine Karstformen beobachtet.

Aus diesem Grund werden diese drei, zu Beginn der Arbeit noch zu den hinsichtlich der Verkarstungsfähigkeit wichtigsten Einheiten im Untersuchungsgebiet zugeordneten, Lithologien nicht zu den weiteren Berechnungen hinsichtlich der Morphologie und räumlichen Verteilung der Karstformen im alpinen Raum NÖs miteinbezogen. Daher werden 354 Dolinen, 22 Ponore und 18 Karrenvorkommen, denen eine dieser drei Lithologien zugrunde liegt, im finalen Datensatz nicht berücksichtigt. Jedoch wird festgehalten, dass sich an der Grenze zu diesen Einheiten teilweise eine erhöhte Dichte an Karstformen ausgebildet hat.

5.1. Verkarstungsfähige Gesteine und ihre Verteilung

In NÖ, mit einer Fläche von 19.186 km², beträgt der Anteil an verkarstungsfähigen Gesteinen an der Oberfläche gemäß der vereinheitlichten digitalen geologischen Karte 2318 km², was 12 % der Gesamtfläche des Bundeslandes entspricht. Der alpine Raum NÖs (wie in Abb. 1 dargestellt) hat eine Fläche von 4050 km². Dessen Anteil an verkarstungsfähigem Gestein an oder nahe der Oberfläche beläuft sich auf 57 %. In Tabelle 5 sind die flächenmäßig am weit verbreitetsten Lithologien festgehalten.

In den Gesteinen der Hallstätter Fazies des alpinen Raum NÖs wurden ebenfalls keine Karstformen aufgenommen.

Tabelle 5: Flächen der wichtigsten alpinen lithologischen Einheiten Niederösterreichs. Reine Dolomite sind grau, reine Kalke blau hinterlegt.

Lithologie	Fläche [km ²]	%
Haupt- und Dachsteindolomit	929	40 %
Wettersteindolomit	343	15 %
Gutensteiner Kalk und Dolomit	215	9 %
Steinalm- und Wettersteinkalk	196	8 %
Opponitz-Formation	146	6 %
Dachsteinkalk	145	6 %
Haselgebirge und Werfen-Formation	59	3 %
Metakarbonate der Mitteltrias i.A.	57	2 %
Plattenkalk	43	2 %
verkarstungsfähige Jura i.A.	32	1 %
Reifling-Formation	32	1 %
Oberrät-Riffkalk	26	1 %
Raminger Kalk	26	1 %
Karbonatisches Baden	22	1 %
Rauhwacke	17	1 %
Plassenkalk	11	0,5 %
Hallstätter Fazies	9	0,4 %
Oberseebrekzie	7	0,3 %
Grafensteigkalk	4	0,2 %
Gesamtfläche der wichtigsten verkarstungsfähigen Lithologien im alpinen Raum NÖs	2318	100 %

Der Haupt- und Dachsteindolomit macht mit 40 % mehr als ein Drittel der Gesamtfläche aus. Andere weitverbreitete Lithologien sind der Wettersteindolomit, der Gutensteiner Kalk und Dolomit sowie der Steinalm- und Wettersteinkalk. Die als Dolomite bezeichneten lithologischen Einheiten nehmen 55 % der Fläche ein, die Kalklithologien lediglich 28 %. Demnach sind diese im Untersuchungsgebiet deutlich geringer verbreitet.

In Abbildung 10 ist die prozentuale Flächenverteilung (Tab. 5) der wichtigsten Lithologien des alpinen Raum NÖs graphisch aufbereitet.

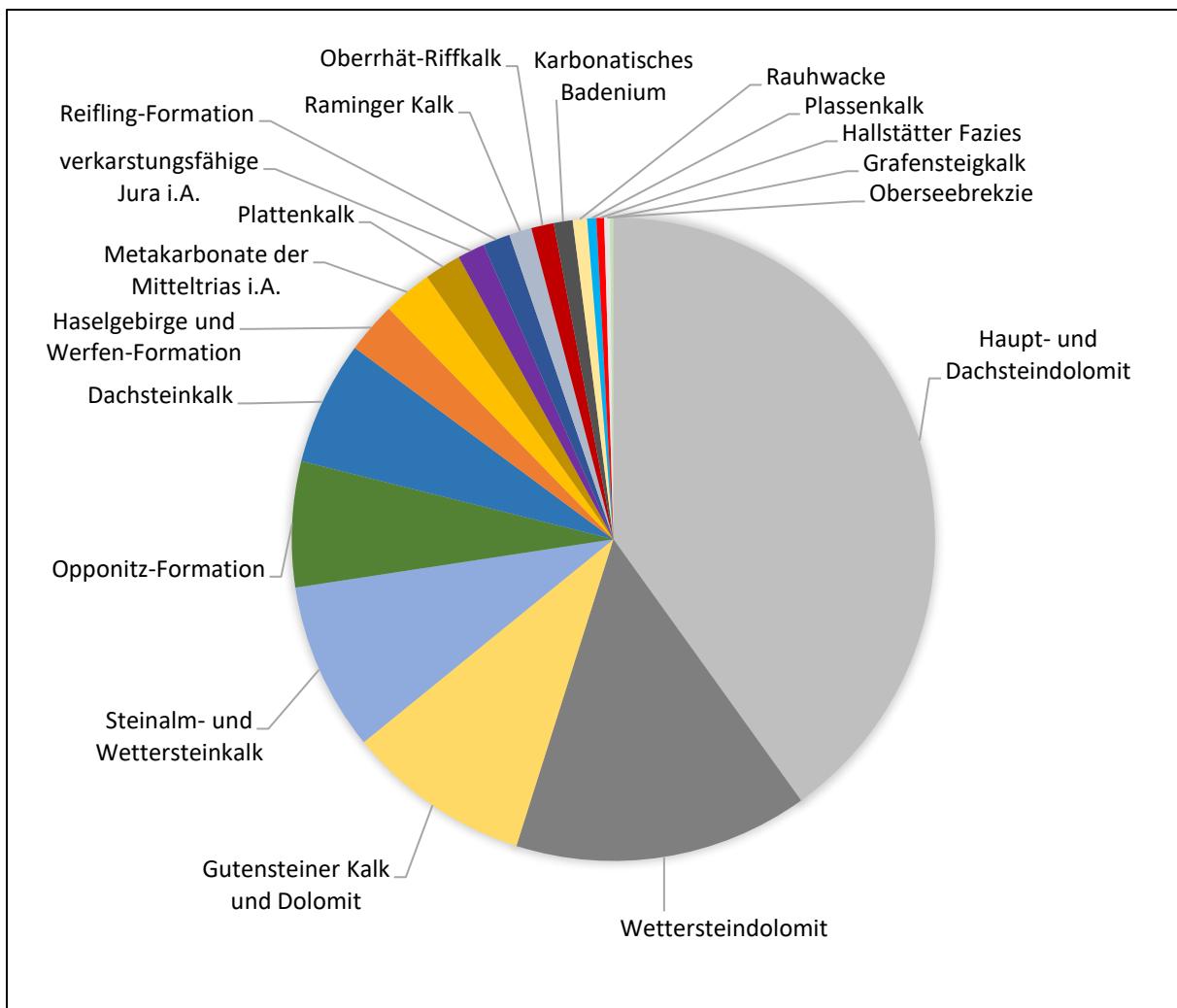


Abbildung 10: Prozentuale Verteilung der wichtigsten Karstgesteine im alpinen Raum Niederösterreichs.

5.2. Charakterisierung der Karstformen

Insgesamt wurden der finalen digitalen Karte des Untersuchungsgebiets (Abb. 16) 14.425 Dolinen mit Durchmessern < 25 m, 1034 Dolinen mit Durchmessern ≥ 25 m, zwölf Glaziokarst-Hohlformen, fünf Poljen, 248 Ponore und 900 Karrenvorkommen beigelegt. Der nachstehenden Tabelle 6 ist zu entnehmen, aus welchen Quellen die diversen Karstformen übernommen wurden, beziehungsweise ob diese im Zuge dieser Arbeit aufgenommen wurden.

Tabelle 6: Alle kartierten Karstformen des alpinen Raum Niederösterreichs und deren Datenursprung; Verwendete Abkürzungen: Dol. ... Dolinen, Gk.H. ... Glaziokarst Hohlform.

Quelle	Dol. < 25 m	Dol. \geq 25 m	Ponore	Karren	Gk.H.	Poljen
Im Zuge dieser Masterarbeit mittels Laserscan digital berechnete und mit Fernerkundung verifizierte Hohlformen	10.268	250	9	0	1	1
Geländearbeit im Zuge dieser Masterarbeit	163	132	11	87	1	0
NÖ-Karst-Projekt, 2017-2020 (Plan et al. 2019)	1.859	240	117	543	2	1
Der Dürrenstein (Fink 1973)	293	105	15	0	0	0
Färbeversuch am Schlagerbodenpolje (Fink 1965)	1	2	1	0	0	0
Karstmorphologische und -hydrologische Beobachtungen in den Göstlinger Alpen (Nagl 1970)	69	14	17	84	0	0
GK 58 - Baden (Schnabel 1998)	8	0	0	0	0	0
GK 71 - Ybbsitz (Ruttner und Schnabel 1988)	47	8	2	0	0	0
GK 72 - Mariazell (Bauer und Schnabel 1997)	17	12	1	0	0	0
Die Höhlen Höhlen Niederösterreichs Band 1-5 (Hartmann und Hartmann 1979-2000)	36	3	2	0	0	0
Projekt Hydro Ybbs West (Plan 2005b)	105	47	27	0	0	0
KGK 4329 Wilhelmsburg (Fink 2011)	7	0	0	0	0	0
KGK 70 - Waidhofen/Ybbs (Pavuza und Traindl 1984)	22	0	0	0	0	0
KGK 72 - Mariazell (Fink 2007)	86	24	8	0	0	1
KGK 73 - Törl (Fink 1999)	41	15	5	0	0	0
KGK Rax - Schneeberg Pavuza et al., 1993	8	0	0	0	0	0
Karstkartierung für Wiener Wasser (Plan 2001-2006)	1.187	159	16	186	8	2
unpublizierte Kartierungsergebnisse Plan	205	19	14	0	0	0
Masterarbeit (Schober 2014)	1	0	0	0	0	0
Markierungsversuch Ursula Quelle (Völkl 1987)	2	0	2	0	0	0
Masterarbeit (Seidl 2012)	0	4	0	0	0	0
Hydrogeologischer Bericht Reichenau-Mürzzuschlag (Zojer 1990)	0	0	1	0	0	0
Gesamt	14.425	1.034	248	900	12	5

5.2.1 Poljen

Insgesamt wurden fünf der Karsthohlformen des Untersuchungsgebietes als Poljen klassifiziert. Die größte davon stellt die „Bodenwiese“ mit einer Fläche von 2,4 km² dar. Auch das Schlagerbodenpolje und das Polje „Auf den Böden“ wurden bereits von Fink (2007) als solche klassifiziert und beschrieben. Ein weiteres Polje, der „Bärwiesboden“, wurde südlich des Dürrenstein Gipfels kartiert.

5.2.2 Glaziokarst-Hohlformen

Es wurden zwölf Glaziokarst-Hohlformen kartiert. Diese, im Zuge der pleistozänen Kaltzeiten durch glaziale Prozesse überprägten Hohlformen, weisen zudem Formen auf, welche durch Karstprozesse entstanden. Die größte im Untersuchungsgebiet kartierte Glaziokarst-Hohlform hat eine Fläche von 0,2 km². Auf dem Rax-Plateau wurden im Zuge des Projektes Karstkartierung Wiener Wasser (Plan et al. 2007) sieben solcher Karstformen aufgenommen. Drei weitere Glaziokarst-Hohlformen liegen im SSW des Hochkars, eine am Schneeberg-Plateau und eine südlich des Kleinen Dürrensteins.

5.2.3 Dolinen

Die 14.425 Dolinen mit Durchmessern < 25 m, sowie 1034 Dolinen mit Durchmessern ≥ 25 m wurden weiter differenziert, was in Tabelle 7 festgehalten ist. Die Abbildung 9 stellt beispielhaft eine Doline des Untersuchungsgebietes dar.

Tabelle 7: Unterteilung der Dolinen des alpinen Raum NÖs und deren Häufigkeiten.

Klassifikation	Doline < 25 m	Doline ≥ 25 m	Gesamt
Doline	11.785	878	12.663
Doline mit Tümpel	76	26	102
Gips?doline	119	22	141
Gips?doline mit Ponor	1	0	1
Gips?doline mit Tümpel	4	1	5
Gipsdoline	620	44	664
Gipsdoline mit Ponor	5	0	5
Gipsdoline mit Tümpel	3	1	4
mögliche Doline	1.195	40	1.235
mögliche Doline mit Ponor	4	0	4
mögliche Doline mit Ponor?	3	0	3
mögliche Doline mit Tümpel	5	2	7
mögliche Gips?doline	87	7	94
mögliche Gips?doline mit Tümpel	3	1	4
mögliche Gipsdoline	381	12	393
Ponor?doline	16	0	16
Ponordoline	118	0	118
	14.425	1.034	15.459

5.2.4 Karrenvorkommen

Aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes sowie der fehlenden Fernerkundungsmethodik ist die lückenlose Kartierung der Karrenvorkommen über das gesamte Gebiet nicht möglich. Die im Gelände begangenen Gebiete können hinsichtlich dieser Karstform als valide angesehen werden, jedoch fehlen aus vielen Gegenden Daten. Die im Gelände kartierten Karrenvorkommen wurden teilweise differenziert. 32 freiliegende (Abb. 11), 468 subkutane Karrenvorkommen sowie 400 Vorkommen, bei denen beide Formen auftreten, wurden aufgenommen. Anschließend wurden statistische Auswertungen an diesen 900 Karrenvorkommen durchgeführt.



Abbildung 11: Zwei verschiedene Typen freiliegender Karren am Dürrenstein-Plateau. Links: Rillenkarren. Rechts: Rinnenkarren.

5.2.5 Ponore

Insgesamt wurden 248 Ponore im alpinen Raum NÖs kartiert, wovon 154 (mögliche) Ponordolinen sind, also Dolinen darstellen, in welchen permanent oder zeitweise Oberflächengerinne im Untergrund verschwinden. Dem gegenüber stehen 94 Ponore, also Stellen an denen Wasser ohne Oberflächenhohlform in den Untergrund eintritt. All diese Karstformen werden zu den statistischen Auswertungen herangezogen. Manche der Ponore sind stark verwachsen, ein Wasserlauf oberhalb ist jedoch zu erkennen (Abb. 12).



Abbildung 12: Bewachsener Ponor am Dürrenstein-Plateau.

5.2.6 Beispiel einer Hohlform beim Eisenstein, die keine Karstform ist

Am SE-Hang des Eisensteins nahe Türnitz befindet sich auf einer Seehöhe von etwa 850 m eine markante Hohlform (Abb. 13, 14, 15), die von Fink (1999) als Karstmulde kartiert wurde. Die Hohlform hat einen Durchmesser von 200 m und wird durch einen gleichmäßig abgerundeten Wall begrenzt, der aus gerundetem Lockermaterial aufgebaut wird.



Abbildung 13: Runder Wall, der die Hohlform am SE-Hang des Eisensteins bei Türnitz begrenzt. Rechts liegt die Hohlform (Foto: Eva Kaminsky).

Um die Hohlform ist kein Kalkstein anstehend, jedoch ist am Hang oberhalb Haupt- und Dachsteindolomit kartiert. Wälle werden bei hauptsächlich durch Karstprozesse gebildeten Hohlformen nicht beobachtet. Diese werden im alpinen Raum viel eher mit glazialen Prozessen in Verbindung gebracht. Um diese beobachtete Hohlform in einer derart geringen Seehöhe und dieser SE-Ausrichtung vorzufinden, muss davon ausgegangen werden, dass sich diese in den Eiszeiten des Pleistozäns ausgebildet hat.

Die Bildung beginnt durch ein Schneefeld am Hang, welches dazu führt, dass im oberen Bereich Klüfte entstehen, in die Schuttmaterial fällt, welches an der Basis des Schnees oder an Gleitflächen nach unten getragen wird, wo eine Art Moränenwall entsteht. Der steigende Wall führt zu dickeren Schneefeldern, die wiederum zu größerer Klüftigkeit führen und somit wieder mehr Material anliefern. In diesem Fall dürfte sich ein kleines Kar ausgebildet haben, welches als stationär angesehen wird. Es ist nicht auszuschließen, dass sich unter dieser Form ein Karstsystem ausgebildet hat, wodurch Wasser unterirdisch abtransportiert wird. Hinweise dafür können an der Oberfläche aber nicht beobachtet werden.

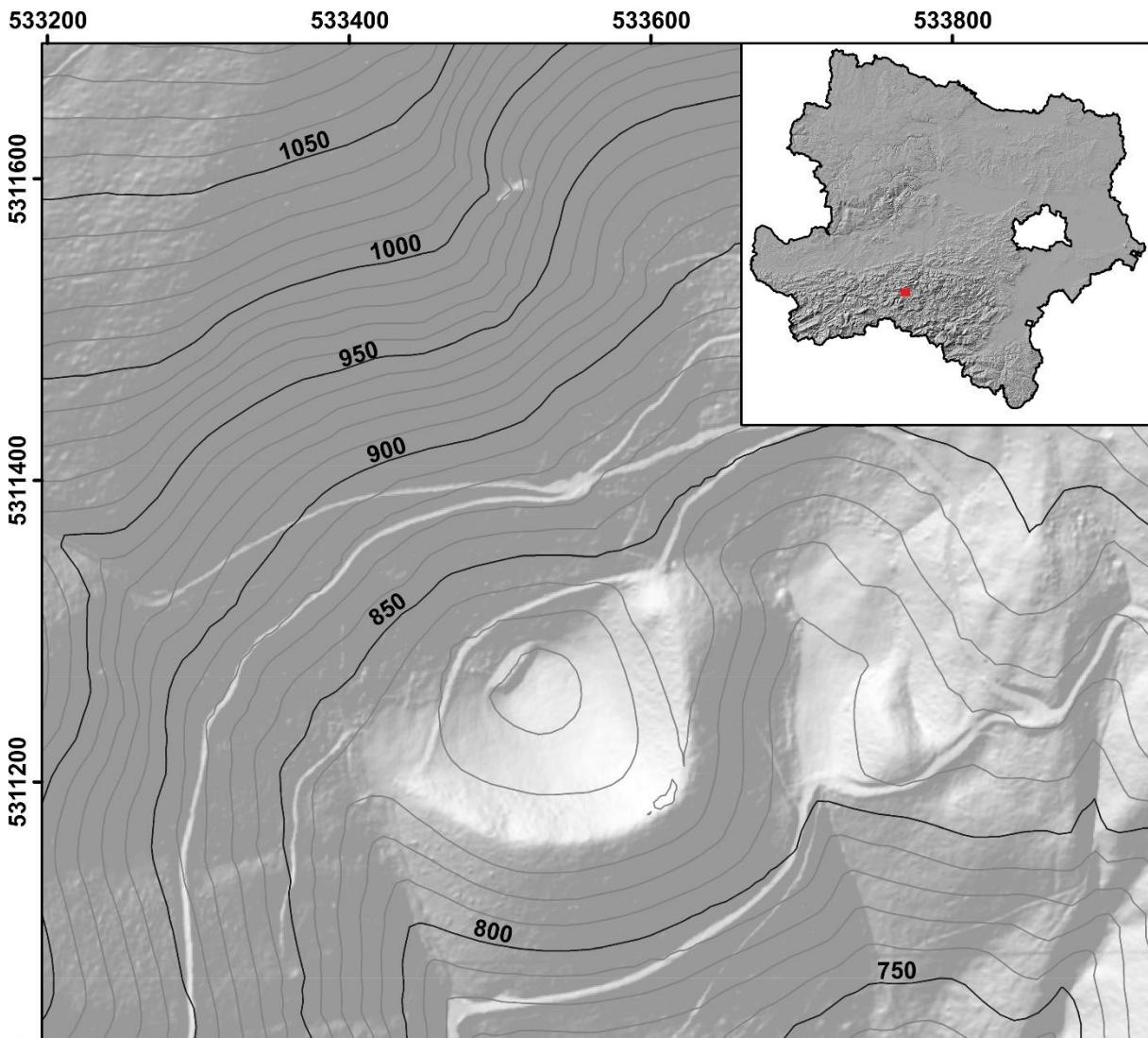


Abbildung 14: Markante Hohlform mit einem Durchmesser von etwa 200 m, welche südöstlich des Eisensteins bei Ternitz liegt. Die äußere Begrenzung wird als Moränenwall interpretiert. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: schattiertes ALS-Geländemodell.



Abbildung 15: Hohlform am SE-Hang des Eisensteins bei Türnitz. Blickrichtung gegen Osten (Foto: Lukas Plan).

5.3. Karstmorphologische Karte

Die karstmorphologische Karte (Abb. 16) bildet alle Karstformen im alpinen Raum NÖs ab und soll einen groben Überblick über deren räumliche Verteilung bieten.

Generell wurden die Karsthohlformen unterteilt in jene mit Durchmessern ≥ 25 m und jene < 25 m. Außerdem wurde eine Klassifizierung der Hohlformen in Dolinen, Poljen, Glaziokarst-Hohlformen, Gipsdolinen und mögliche Dolinen gemacht. Bei Letzteren konnten andere Prozesse zur Entstehung der Hohlform nicht ausgeschlossen werden. Weitere Karstformen, wie Karrenvorkommen und Ponore wurden ebenfalls in die Karte aufgenommen.

Die Karte des Untersuchungsgebiets lässt eine unregelmäßige Verteilung der Karstformen erkennen. In einigen Gebieten ist eine erhöhte Dichte an Karsthohlformen ausgebildet. Aus diesem Grund werden diese Kartenausschnitte (Abb. 16 A, B, C, D) in den folgenden Unterkapiteln detaillierter betrachtet. Ein nennenswertes Beispiel stellt die Vielzahl an Gipsdolinen in der Gegend um Puchenstuben und Annaberg (Abb. 16 C) dar, welche sich in einem schmalen Streifen nach Westen weiterzieht und das prominenteste Gipskarstgebiet des alpinen Raum NÖs darstellt.

Aus karstmorphologischer Sicht sind auch weitere Gebiete des alpinen Raum NÖs interessant. Auf der Feldwiesalm und am Rax-Plateau zeigen sich erhöhte Dichten an Karstformen, wobei auf der Rax zudem die Glaziokarst-Hohlformen hervorzuheben sind. Das Polje auf der „Bodenwiese“ ist mit einer Fläche von $2,4 \text{ km}^2$ die größte Karsthohlform NÖs und wurde bereits von Plan et al. (2007) beschrieben. Charakteristische, teils periodische Oberflächengerinne, welche an der Poljenumrahmung durch Ponore wieder in den Untergrund infiltrieren, sind beim Polje am Schlagerboden kartiert. Der Traflberg stellt ansatzweise ein Karstplateau dar. Im Gegensatz zur Umgebung werden dort eine große Doline und vereinzelt kleine Hohlformen beobachtet, was möglicherweise auf gut verkarstungsfähiges Gestein hindeutet. Außerdem wurden auch auf der Hohen Wand einige teils großflächige Karstformen kartiert.

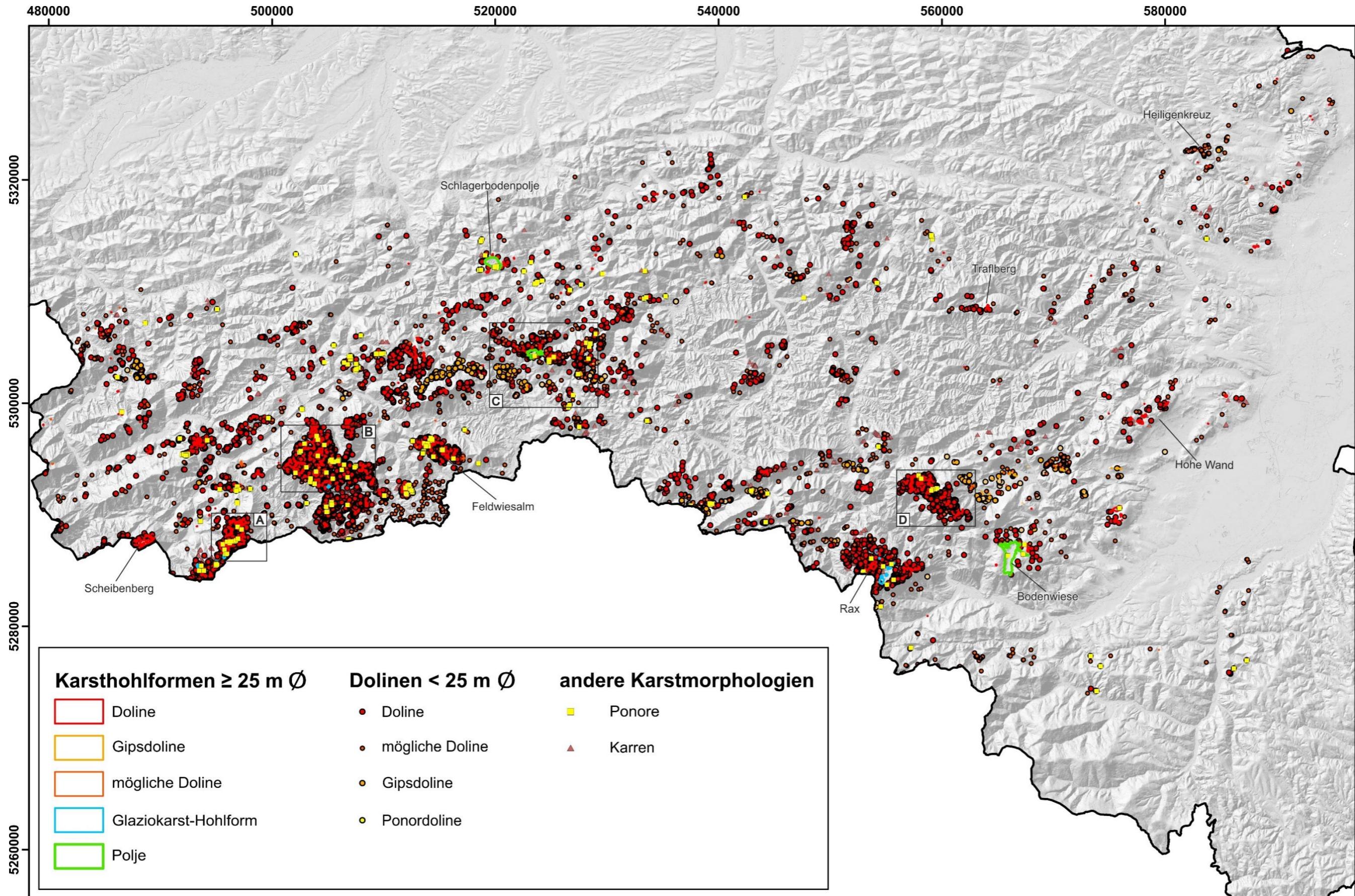


Abbildung 16: Karstmorphologische Karte des alpinen Raum NÖs: sämtliche bekannte auf Karstprozesse zurückzuführende Karstformen sind darin abgebildet und geben einen Überblick über deren räumliche Verteilung. A) Hochkar-Plateau; B) Dürrenstein-Plateau; C) Gebiet zwischen Puchenstuben und Annaberg; D) Schneeberg-Plateau; Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: ALS Geländemodell.

5.3.1 Hochkar

Die lithologische Karte (Abb. 8) zeigt, dass das Hochkar-Plateau großflächig von Dachsteinkalk, untergeordnet im südlichen Kartenausschnitt auch von Oberrhät-Riffkalk, aufgebaut wird. Die kartierten Karstformen (Abb. 17) wurden bereits von Nagl (1970) aufgenommen und größtenteils im Zuge des NÖ-Karst-Projektes (Plan et al. 2019) überprüft, da die Geometrie der alten Karte sehr schlecht war. Zudem wurden einige, im nördlichen Bereich um den Hühnerkogel gelegene, Karstformen vom Autor dieser Arbeit begangen. Diese Gegend zeigt, neben der karähnlichen Form „Im Kessel“ zwischen Lahner- und Ringkogel, die größte Dichte an Karstformen.

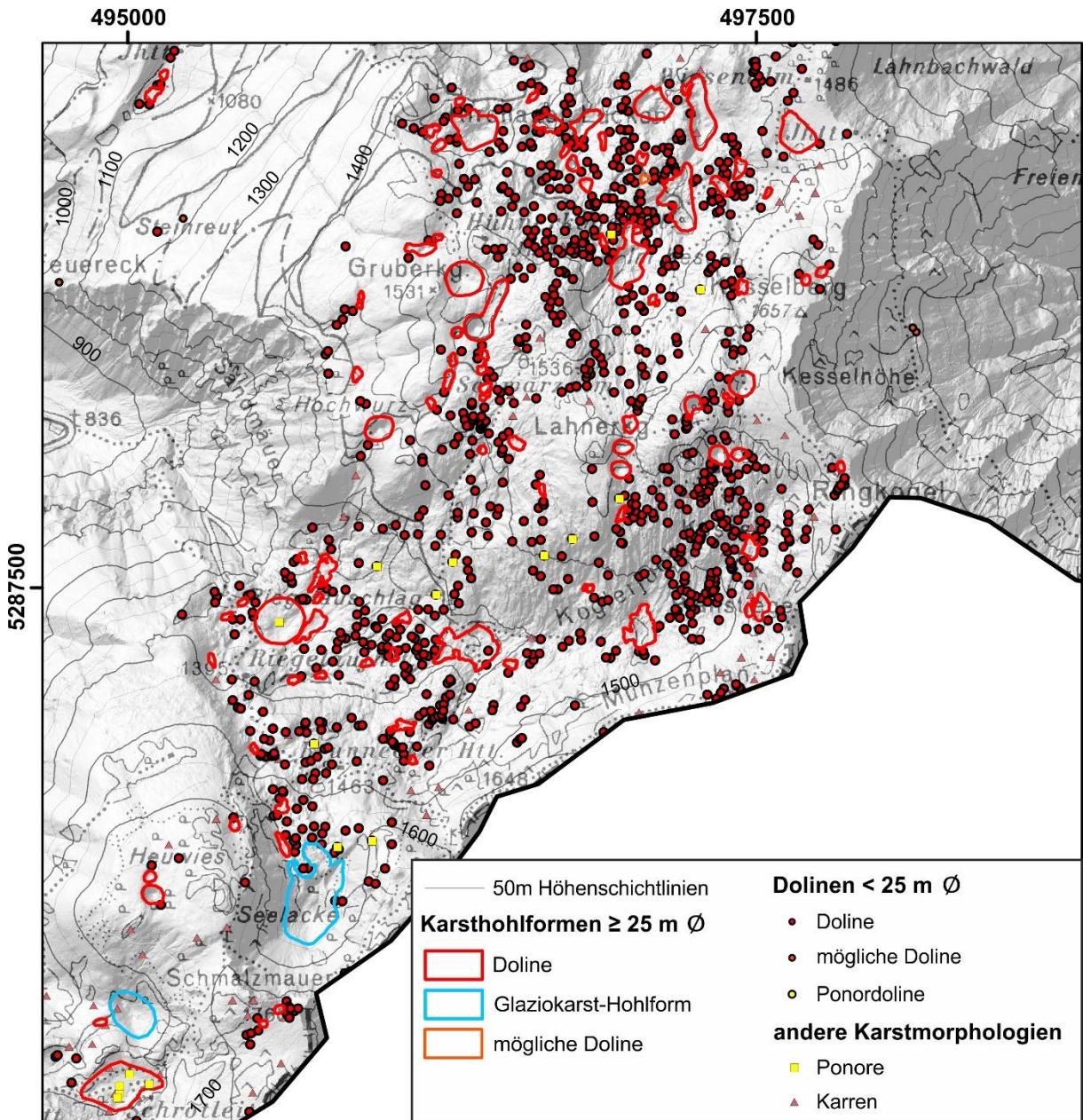


Abbildung 17: Karstmorphologische Karte des Hochkar-Plateaus. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: ÖK 50 und ALS Geländemodell.

In diesem Kartenausschnitt (Abb. 17) sind eine mögliche Doline sowie 88 Dolinen mit Durchmessern $\geq 25 \text{ m}$ enthalten. Des Weiteren sind 1009 Dolinen mit Durchmessern $< 25 \text{ m}$ kartiert, wovon sechs

mögliche Dolinen, zehn Ponordolinen und eine mögliche Gipsdoline darstellen. Außerdem enthält diese karstmorphologische Karte zwei Glaziokarst-Hohlformen, 17 Ponore sowie 74 Karrenvorkommen.

Spezielle Karsthohlformen stellen die beiden, bei der Seelacke, im SW des Kartenausschnitts lokalisierten, polygenetischen Glaziokarst-Hohlformen dar, welche zum Teil auch im Oberrät-Riffkalk liegen. Außerdem wird auf die Hohlform, welche mehrere Ponore enthält, bei Schrotleitnerhütte im SW, hingewiesen. Die wasserstauende Schicht wird dort von nicht-verkarstungsfähigen jurassischen Gesteinen gebildet.

5.3.1.1. Interpretation der Karstmorphologie am Hochkar

Das beschriebene Plateau zeigt ausgeprägte, dichte oberflächliche Verkarstung. Die mittlere Dichte liegt für diesen Kartenausschnitt bei 90 Dolinen pro km². Im Hinblick auf die lithologische Karte (Abb. 8) ergibt sich der Schluss, dass der hier dominant auftretende Dachsteinkalk ein stark verkarstungsfähiges Gestein darstellt. Das Fehlen von Gipsdolinen am Hochkar führt zur Annahme, dass in diesem Gebiet nur Karst in Karbonatgestein auftritt. Bei den beiden polygenetischen Karsthohlformen im südlichen Kartenbereich handelt es sich um Hohlformen, welche sowohl durch glaziale Erosion während der pleistozänen Kaltzeiten als auch durch Verkarstung entstanden. Die im Bereich von Ponoren im Untersuchungsgebiet auftretenden wasserstauenden Schichten werden großteils von Lunzer Schichten gebildet. Die in der Doline bei der Schrotleitnerhütte kartierten wasserstauenden nicht-verkarstungsfähigen jurassischen Gesteine werden im restlichen Untersuchungsgebiet nicht beobachtet.

5.3.2 Karstmorphologie am Dürrenstein

Die lithologische Karte (Abb. 8) zeigt, dass das Dürrenstein-Plateau großteils aus Dachsteinkalk besteht, wobei untergeordnet auch Haupt- und Dachsteindolomit kartiert wurde. Das gesamte Gebiet östlich des Kleinen Dürrensteins und des Obersees wiederum ist als Oberseebrekzie kartiert. Viele, v.a. größere Oberflächenkarstformen (Abb. 18) hat bereits Fink (1973) kartiert. An zwei Geländetagen wurden zudem weitere Karstformen dieses Gebiets aufgenommen. Da das Dürrenstein-Plateau so weitläufig ist, wurden alle weiteren, nicht im Lokalaugenschein betrachteten, Hohlformen den Sinks entnommen.

Insgesamt sind in diesem Kartenausschnitt 197 Dolinen mit Durchmessern ≥ 25 m abgebildet, wovon fünf mögliche Doline darstellen. Des Weiteren sind 5307 Dolinen mit Durchmessern < 25 m abgebildet, wovon 13 Ponordolinen und 19 mögliche Dolinen sind. Außerdem enthält diese Karte eine Glaziokarst-Hohlform, 30 Ponore und 26 Karrenvorkommen.

Die prominenteste Karsthohlform am Dürrenstein-Plateau ist das Grünloch im NW des Kartenausschnitts. In dieser Arbeit wurde das Grünloch als Doline klassifiziert, welche eine Länge in NE-SW-Richtung von 1,5 km, eine Breite in NW-SE von knapp 1 km und eine Tiefe von über 50 m aufweist. Im Zentrum dieser Hohlform ist der liegende Dachsteindolomit aufgeschlossen.

Außerdem zeigt das Grünloch, dass in geschlossenen Hohlformen eigene Mikroklima vorherrschen können und sich deshalb Pflanzen höherer Vegetationszonen im Kern dieser Karstformen ansiedeln können. So wurde in dieser, auf 1320 m gelegenen, Doline im Februar 1932 eine Temperatur von - 52,6 °C gemessen, was die bisher tiefste in Mitteleuropa aufgezeichnete Temperatur darstellt (Plan 2016).

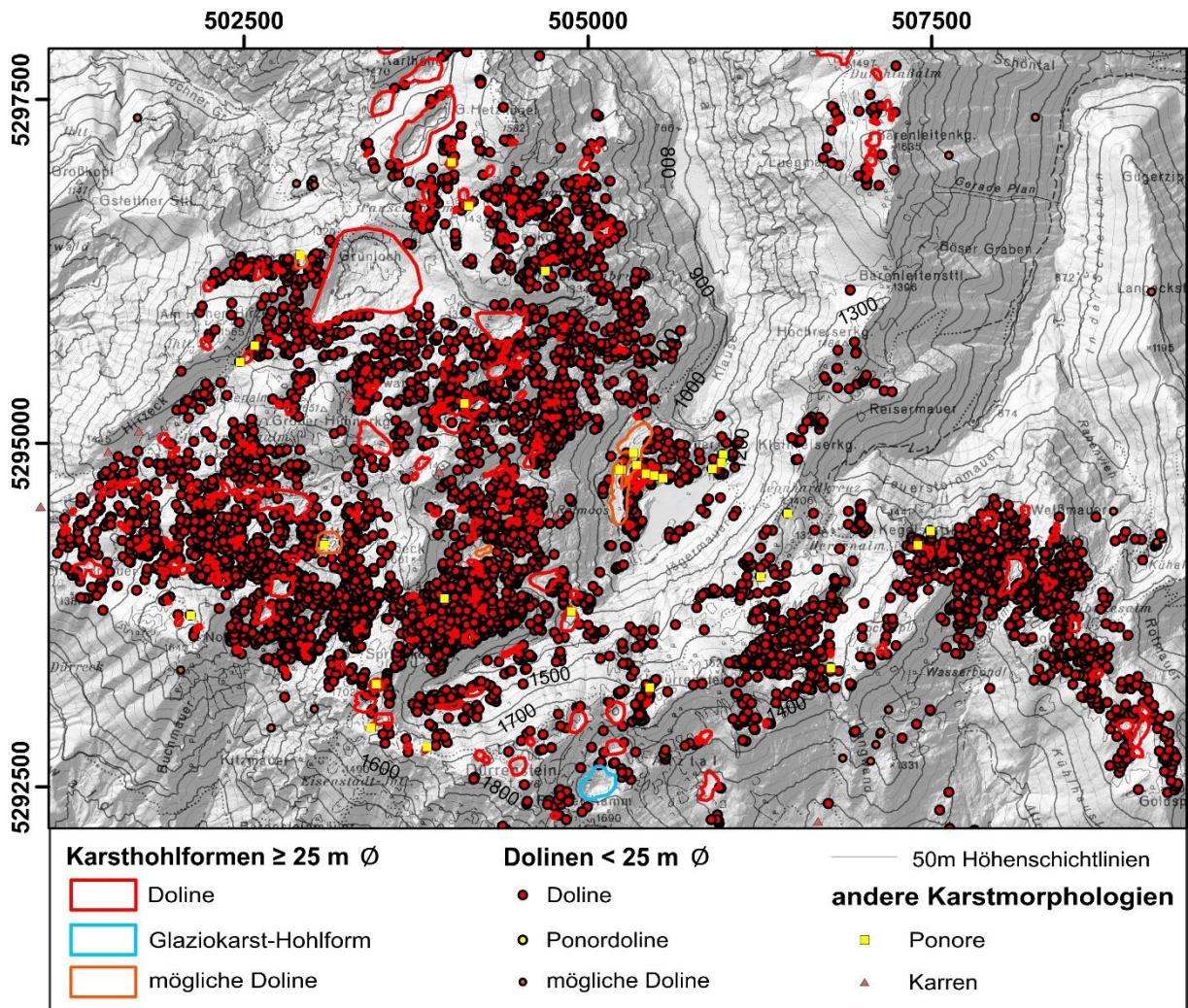


Abbildung 18: Karstmorphologische Karte des Dürrenstein-Plateaus. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: ÖK 50 und ALS Geländemodell.

Von den größeren Dolinen (Durchmesser ≥ 25 m) sind die beiden Hohlformen westlich des Obersees zu erwähnen. Diese sind nicht eindeutig auf die Bildung durch Karstprozesse zurückzuführen und werden aus diesem Grund als mögliche Dolinen beschrieben. Östlich des Dürrenstein-Gipfels befindet sich eine Glaziokarst-Hohlform. Vereinzelte Ponore treten auf dem gesamten Plateau auf, wobei die größte Menge im Bereich des Obersees kartiert wurde. Fink (1973) beschreibt ein Gerinne, welches mehrmals versinkt und wieder austritt.

Im Gebiet zwischen Grünloch und Obersee ist Schichttreppenkarst entwickelt, auf dem bei der Geländebeobachtung freiliegende Karren kartiert wurden. Allgemein ist bezüglich dieses Kartenausschnitts zu bemerken, dass sämtliche Karstformen am Plateau ausgebildet sind, wohingegen diese in den Tälern unterhalb 1100 m Seehöhe fehlen.

5.3.2.1. Interpretation der Karstmorphologie am Dürrenstein-Plateau

Die Geländekartierung hat gezeigt, dass am Dürrenstein-Plateau eine ausgeprägt dichte oberflächliche Verkarstung ausgebildet ist. In einem Gebiet von etwa 45 km² befinden sich 5500 Karsthohlformen, woraus sich eine mittlere Dichte von rund 120 Dolinen pro km² ableiten lässt. Der Vergleich der Morphologie und räumlichen Verteilung der Karstformen mit der lithologischen Karte zeigt, dass

sowohl Dachsteinkalk als auch Oberseebrekzie gut verkarstungsfähige Gesteine darstellen. Dennoch unterscheiden sich beide im Detail. Die mittlere Größe der Dolinen im niedrig gelegeneren Gebiet östlich des Kleinen Dürrensteins, in dem die Oberseebrekzie aufgeschlossen ist, erscheint deutlich kleiner als jene des von Dachsteinkalk aufgebauten Dürrenstein-Plateaus. Gipskarstformen fehlen und es liegt lediglich Karbonatkarst vor. Die Hohlform im SE des Gipfels stellt eine Glaziokarst-Hohlform dar, welche sowohl durch glaziale Erosion während der pleistozänen Kaltzeiten als auch durch Verkarstung entstand.

Auch der am Plateau weit verbreitete Schichttreppenkarst weist auf glaziale Überprägung des Gebietes während der pleistozänen Kaltzeiten hin. Diese charakteristischen Rippen stellen Strukturen dar, welche primär durch glazialen Abtrag freigelegt wurden. Die darauf ausgebildeten Karren sind Indikatoren für die darauffolgende Überprägung durch Karstprozesse.

5.3.3 Puchenstuben / Annaberg

Die lithologische Karte (Abb. 8) zeigt, dass das Gebiet zwischen Puchenstuben und Annaberg von diversen stratigraphischen Einheiten aufgebaut wird. Es handelt sich dabei um Gutensteiner Kalk und Dolomit, Lunzer Schichten, Haselgebirge und Werfen-Formation, Haupt- und Dachsteindolomit sowie Steinalm- und Wettersteinkalk. Im Zuge zweier Geländetage wurden einige Karstformen dieses Kartenausschnitts (Abb. 19) aufgenommen. Aufgrund der Weitläufigkeit dieser Gegend wurden die weiteren, nicht im Gelände kartierten Dolinen den Sinks sowie älteren Publikationen von Fink (1999, 2007) entnommen.

Im Kartenausschnitt zwischen Puchenstuben und Annaberg sind neben einem Polje 66 Dolinen mit Durchmessern ≥ 25 m eingetragen, wovon neun mögliche Dolinen, neun Gipsdolinen und 48 Dolinen darstellen. Außerdem sind 842 Dolinen mit Durchmessern < 25 m kartiert, wovon acht als Ponordolinen, 210 als mögliche Dolinen, 66 als mögliche Gipsdolinen, 149 als Gipsdolinen und 409 als Dolinen klassifiziert wurden. Weiters sind 20 Ponore und 39 Karrenvorkommen aufgenommen.

Im SE der „Waldgegend“ befindet sich die, mit einer Fläche von $0,5 \text{ km}^2$, größte Karsthohlform dieser Gegend, das Polje „Auf den Böden“ (Fink 1969, 2007). An dessen östlichen Rand befinden sich vereinzelte Ponore an der Grenze von Lunzer Schichten zu Haupt- und Dachsteindolomit, am westlichen Rand sind Trichterdolinen kartiert. Östlich des Poljes befindet sich eine große Doline, in deren unmittelbarer Umgebung weitere Ponore kartiert wurden.

In Annaberg, Reith und Richtung Erlaufboden sind einige Gipsdolinen aufgenommen, welche zum Teil bereits in der Masterarbeit von Winkler (2019) kartiert und daraus übernommen wurden.

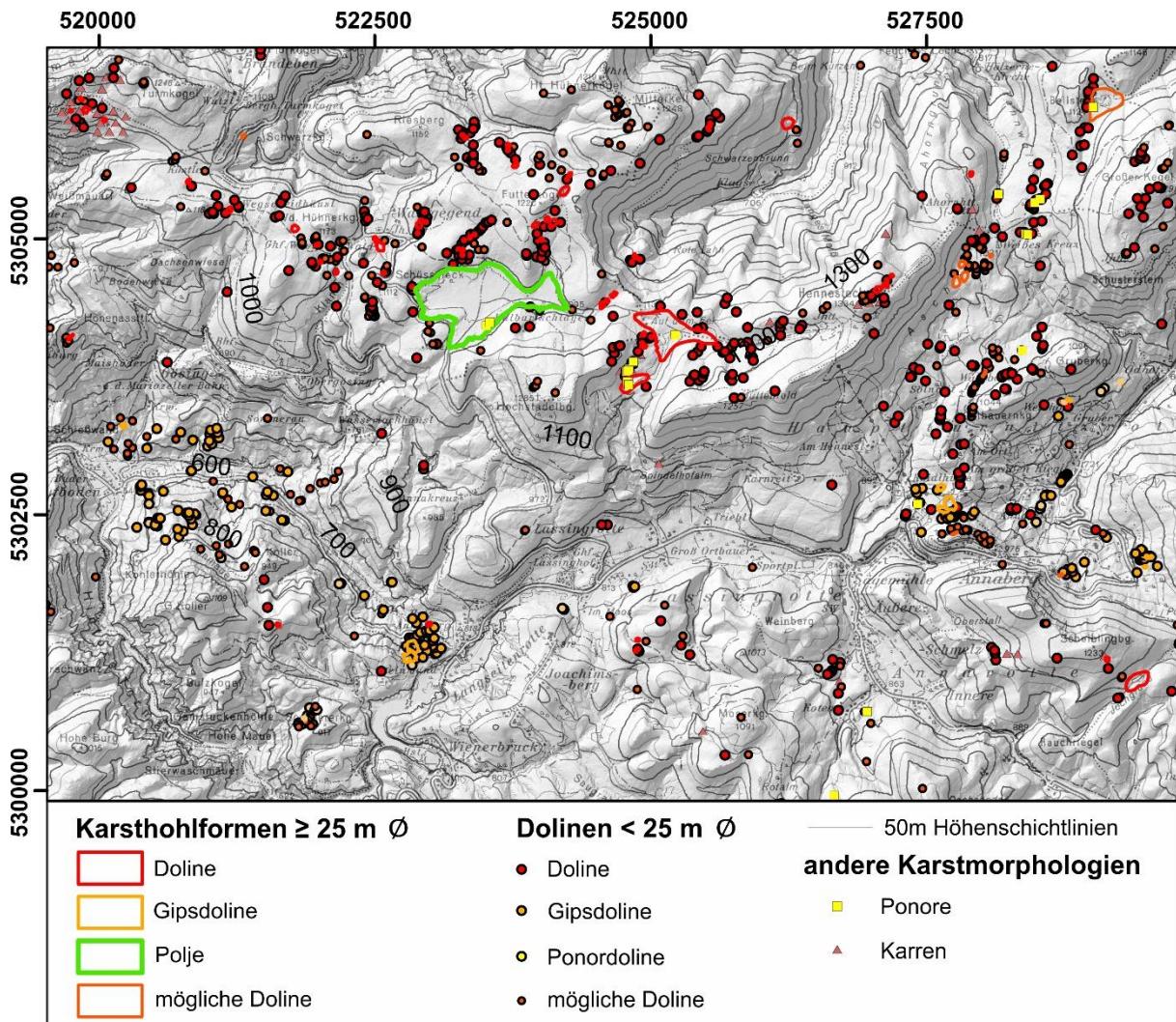


Abbildung 19: Karstmorphologische Karte der Gegend zwischen Puchenstuben und Annaberg. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: ÖK 50 und ALS-Geländemodell.

5.3.3.1. Interpretation der Karstmorphologie im Gebiet Puchenstuben / Annaberg

Das Gebiet zwischen Puchenstuben und Annaberg unterscheidet sich aus karstmorphologischer Sicht deutlich von den Plateaus am Hochkar (Kapitel 5.3.1) und am Dürrenstein (Kapitel 5.3.2), die dem alpinen Karst zugeordnet werden. Im Gegensatz dazu stellt diese deutlich tiefer gelegene Gegend voralpinen Karst dar, der keine Vergletscherung in den pleistozänen Kaltzeiten erfuhr, weshalb auch keine Glaziokarst-Hohlformen vorkommen. Die starke Bewaldung in diesem Gebiet ist auf die vergleichsweise tiefe Seehöhe unterhalb der Baumgrenze zurückzuführen, wobei nur sehr wenige subkutane Karrenformen in diesem Gebiet kartiert sind. Die räumliche Verteilung der Karstformen erscheint heterogen, wobei einzelne Flächen mit erhöhter Dichte an Karstformen ins Auge springen. Die mittlere Dichte im Kartenausschnitt liegt bei 14 Dolinen pro km^2 .

Die größte beschriebene Karsthohlform dieser Gegend wurde von Fink (1969, 2007) als Polje klassifiziert. Dieser beschrieb diese als große, oberirdisch abflusslose Wanne und Kernstück dieses Karstreliefs mit Dolinenfeldern und funktionslosen Trockentälern. Das Polje weist einen, von wasserstauenden Lunzer Schichten bedeckten flachen Boden auf, auf welchem periodische kleine Oberflächengerinne erkennbar sind, die am Westrand durch Trichterdolinen wieder in den Untergrund

infiltrieren. Die Umrahmung der Karsthohlform besteht aus Gutensteiner Kalk und Dolomit sowie Hauptdolomit. Alle weiteren Dolinen um das Polje „Auf den Böden“ stellen ebenfalls Karstformen in karbonatischem Gestein dar.

Im Gegensatz dazu sind nahe Annaberg, Gössing und Reith Gipsdolinen aufgeschlossen. Einige dieser Hohlformen stellen charakteristische trichterförmige Suffosionsdolinen dar. Diese charakteristische Form entsteht mitunter auch durch die vielfach höhere Löslichkeit von Gipsen, welche im permoskythischen Haselgebirge abgelagert wurden. Diese Lithologie ist in NÖ nur lokal aufgeschlossen, birgt bautechnisch aber eine große Gefahr. Bereits Winkler (2019) beschreibt die immer wieder auftretenden Probleme aufgrund des Gipskarstes im Ort Annaberg.

Die vermehrte Ausbildung von Ponoren im Zentrum dieses Kartenausschnitts ist an den Wechsel von Gutensteiner Kalk und Dolomit zu Lunzer Schichten gebunden. Dieses Gebiet unterscheidet sich grundlegend von den anderen Teilausschnitten.

5.3.4 Schneeberg

Die lithologische Karte (Abb. 8) zeigt, dass der Schneeberg hauptsächlich von Steinalm- und Wettersteinkalk aufgebaut wird. Untergeordnet sind, v.a. im Gebiet zwischen Kuh- und Hochschneeberg, Wettersteindolomit und Grafensteigkalk aufgeschlossen. Eine große Anzahl, der in diesem Kartenausschnitt (Abb. 20) abgebildeten Karstformen, wurde aus der Arbeit von Plan et al. (2019) übernommen. Die weiteren, nicht im Lokalaugenschein betrachteten, Hohlformen, wurden den Sinks entnommen.

Abbildung 20 bildet eine Glaziokarst-Hohlform sowie 91 Dolinen mit Durchmessern ≥ 25 m, wovon sechs mögliche Gipsdolinen, drei Gipsdolinen und 82 Dolinen sind, ab. Außerdem wurden 921 Dolinen mit Durchmessern < 25 m kartiert, von denen drei Ponordolinen, sieben mögliche Dolinen, 16 mögliche Gipsdolinen, 28 Gipsdolinen und 867 Dolinen darstellen. Des Weiteren wurden 96 Karrenvorkommen und sechs Ponore kartiert.

Die Verteilung der Karstformen am gesamten Schneeberg-Plateau erscheint relativ gleichmäßig. Hervorzuheben ist, dass die Dolinen mit Durchmessern ≥ 25 m am Kuhschneeberg stärker verbreitet sind, wohingegen die Dichte an Karstformen am Hochschneeberg zwar gleich erscheint, die Größe der Dolinen jedoch deutlich geringer ist.

Eine Vielzahl beobachteter Ponore, aber auch die einzige Glaziokarst-Hohlform befinden sich in der Gegend um den Ochsenboden, zwischen Kuh- und Hochschneeberg. Die beschriebenen Gipsdolinen liegen deutlich unterhalb des Schneeberg-Plateaus, am NE Hang des Hochschneebergs.

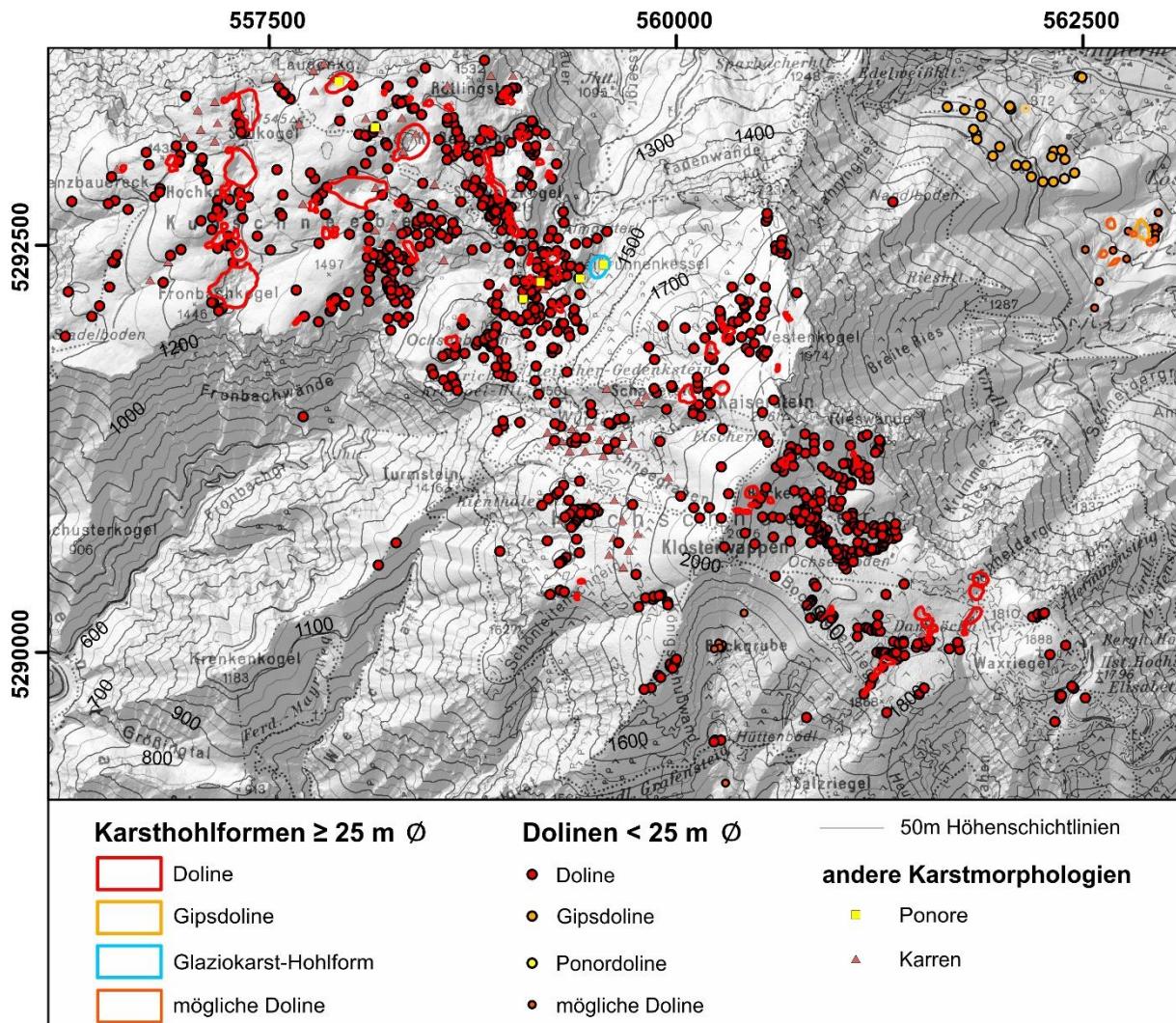


Abbildung 20: Karstmorphologische Karte des Schneeberg-Plateaus. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: ÖK 50 und ALS Geländemodell.

5.3.4.1. Interpretation der Karstmorphologie am Schneeberg

Die Oberfläche des Schneebergs erscheint halbwegs dicht verkarstet. Die gerundete mittlere Dichte an Karstformen im Kartenausschnitt beträgt 50 Dolinen pro km^2 . Der Steinalm- und Wettersteinkalk kann daher als gut verkarstungsfähiges Gestein angesehen werden.

Wie bereits in den Ergebnissen beschrieben, unterscheiden sich die Karsthohlformen am Kuh- und Hochschneeberg in deren Durchmessern deutlich. Dies könnte an der unterschiedlichen Seehöhe der beiden Plateaus liegen. Der Hochschneeberg liegt im Schnitt 400 m höher und wurde während der pleistozänen Kaltzeiten glazial überprägt. Dadurch wurden ehemalige Hohlformen wegerodiert oder abgeflacht und erst nach der Eiszeit wieder durch Karstprozesse beansprucht. Der Kuhschneeberg hingegen liegt auf 1400 m Seehöhe und könnte dieser glazialen Überprägung großteils entgangen sein, weshalb die Karsthohlformen nicht wegerodiert oder abgeflacht wurden, somit ihr Ausmaß behielten und anschließend wieder durch Karstprozessen überprägt wurden. Diese Annahme wird dadurch untermauert, dass am Kuhschneeberg weder Moränen in der geologischen Karte eingetragen sind, noch solche anhand von Fernerkundung beobachtet werden.

Am unteren NE Hang des Hochschneebergs sind innerhalb der Moräne der breiten Ries steile, trichterförmige Hohlformen kartiert. Die Moräne hat ihre Ausbreitung im Zuge der Würm Eiszeit erlangt, weshalb davon ausgegangen wird, dass sich die beschriebenen Hohlformen in den letzten rund 20.000 Jahren entwickelten. In diesem kurzen Zeitraum können sich unter den in Mitteleuropa vorherrschenden klimatischen Bedingungen Dolinen dieses Ausmaßes nicht in Karbonatgestein bilden, weshalb angenommen wird, dass es sich um Gipskarst handelt (Seidl 2012; Winkler 2019).

Die geologische Karte bildet eine NNE-streichende, durch das Gebiet im NE des Ochsenbodens verlaufende, Störung ab, dessen erhöhte Dichte an Karstformen, einschließlich vermehrter Ponore, durch die vergrößerte Angriffsfläche im Bereich von Störungen erklärt. Die polygenetische Glaziokarst-Hohlform (Dreibrunnenkessel) stellt eine Doline dar, welche im Zuge einer der pleistozänen Kaltzeiten ein Kar bildete und seit dem Schmelzen des Gletschers wieder von Karstprozessen überprägt wird.

5.4. Statistische Auswertungen an Dolinen

In den folgenden Kapiteln wird eine Reihe an quantitativen Auswertungen hinsichtlich der Verteilung und der Charakteristika von Dolinen beschrieben. Alle kartierten 15.459 Dolinen, auch jene in karstirrelevanten Lithologien, wurden bei diesen statistischen Auswertungen beachtet.

5.4.1 Statistische Beschreibung der Dolinengeometrie

5.4.1.1 Häufigkeitsverteilung der Dolinentiefe

Die Häufigkeitsverteilung der Dolinentiefe (Abb. 21) wurde quantitativ ermittelt. Das Maximum liegt mit 9045 Dolinen bei einer Tiefe von 2 m. Die Dolinen weisen bei steigender Tiefe eine linkssteile Verteilungskurve auf. Der Übersicht wegen bildet das Diagramm lediglich einen Ausschnitt bis 15 m Tiefe ab. Die maximal kartierte Tiefe von 50 m wurde im Grünloch am Dürrenstein-Plateau festgestellt.

Auf Grund der erschwerten Identifikation kleinmaßstäblicher Dolinen wurde die minimal kartierte Tiefe auf 1 m festgesetzt. Im Durchschnitt haben diese Karstformen eine Tiefe von 2,7 m, was einer geringen Abweichung vom Median entspricht, der bei 2,0 m liegt.

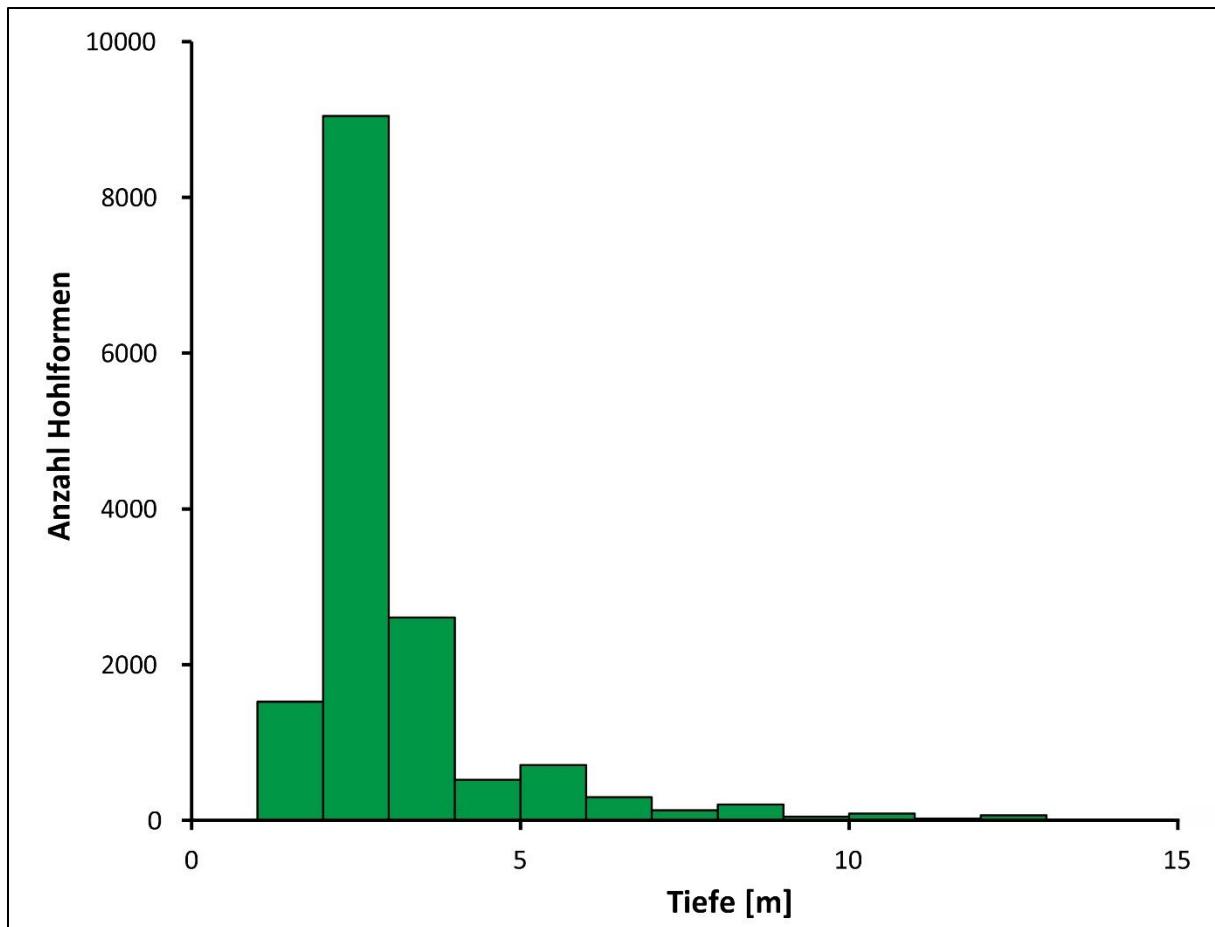


Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der Dolinen in Bezug zu ihrer Tiefe. Die Darstellung reicht nur bis 15 m Tiefe.

5.4.1.2 Häufigkeitsverteilung der Dolinenfläche

Die Gesamtfläche aller im alpinen Raum NÖs kartierten Dolinen beträgt 6,99 km². Die Häufigkeitsverteilung der Dolinenfläche (Abb. 22) wurde in 5-m²-Klassen eingeteilt, wobei die Klasse mit einer Fläche von 5 – 10 m² mit 2505 Dolinen die häufigste darstellt. Das Diagramm weist eine linkssteile Kurve auf, mit steigender Fläche sinkt die Anzahl dazugehöriger Dolinen kontinuierlich. Einzelne Peaks, wie etwa die Flächenklassen 30 – 35, 75 – 80 und 135 – 140 stellen Artefakte der Hochrechnung aufgrund fehlender Daten dar. Das Grünloch am Dürrenstein-Plateau stellt mit 0,38 km² die größte Doline des alpinen Raum NÖs dar. Im Gegensatz dazu nimmt die kleinste dieser Karstformen 4 m² ein. Im Durchschnitt beträgt die Fläche der Dolinen 452 m², der Median mit 23,9 m² weicht davon deutlich ab. Dies liegt daran, dass einzelne große Dolinen, beispielsweise das Grünloch, den Durchschnitt besonders anheben.

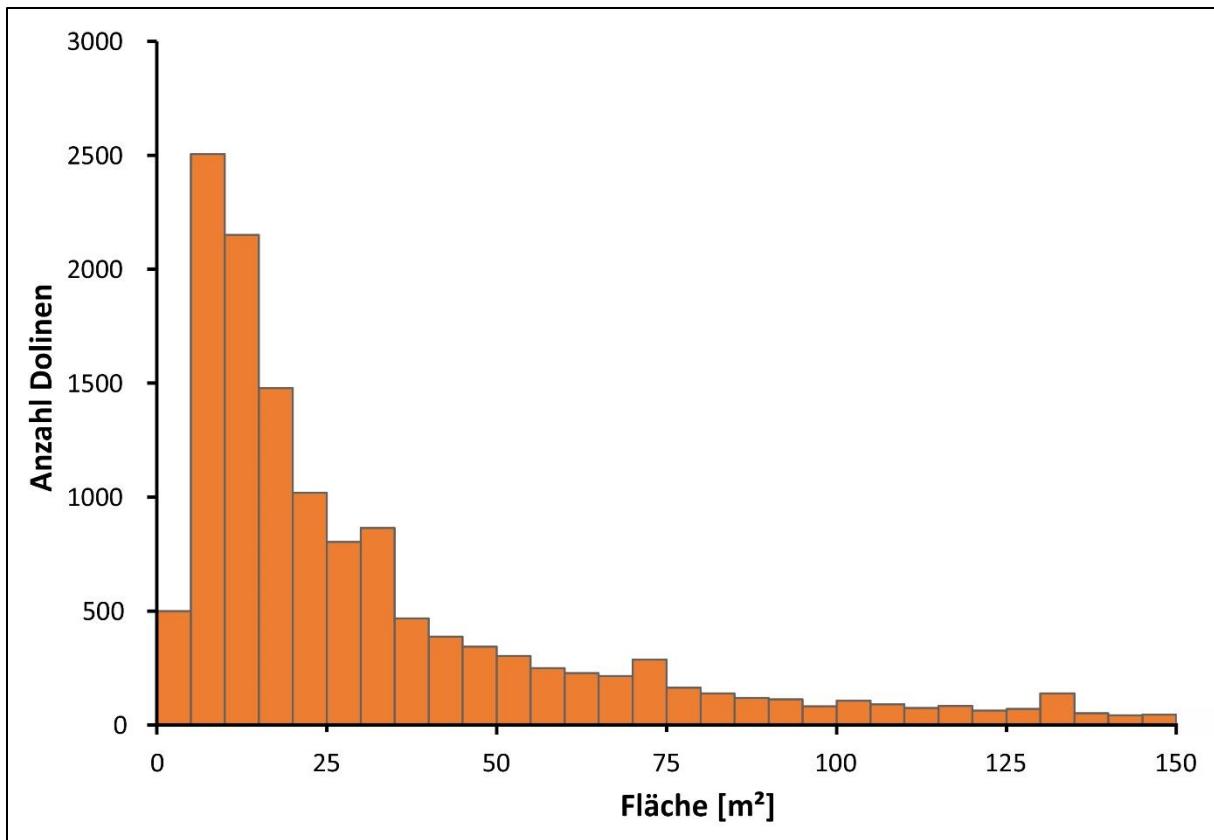


Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung der Dolinen nach der Fläche, welche in 5- m^2 -Klassen unterteilt wurde.

5.4.1.3 Häufigkeitsverteilung der Dolinenvolumina

Abbildung 23 beschreibt die Häufigkeit der Dolinenvolumina im alpinen Raum NÖs. Aus Gründen der Übersichtlichkeit bildet das Diagramm lediglich die Dolinenvolumina von 1 m³ bis 150 m³ ab, alle weiteren, einschließlich des Maximums von 6,3 Mio. m³ (Grünloch), werden in den Berechnungen ebenfalls berücksichtigt. Das berechnete Gesamtvolumen aller Dolinen entspricht 34 Mio. m³, jenes aller Karsthohlformen inklusive Poljen und Glaziokarst-Hohlformen 96 Mio. m³.

Die Dolinenvolumina wurden in 5-m³-Klassen geteilt, wobei mit 3355 Dolinen die Klasse mit einem Volumen zwischen 5 und 10 m³ die häufigste darstellt. Mit steigendem Volumen sinkt die Anzahl an dazugehörigen Dolinen kontinuierlich, wobei die größte, das Grünloch, ein Volumen von 6,3 Mio. m³ aufweist. Auf Grund dieser und weiterer überdurchschnittlich großer Dolinen liegt das mittlere Volumen bei 2192 m³ und somit deutlich höher als der Median von 17,4 m³. Dieser Wert entspricht einem Normkegel mit einem Durchmesser von 4,15 m und einer Tiefe von 1,28 m.

Einzelne Peaks, wie etwa die Volumenklasse 70 – 75 m³, stellen ein Artefakt der Hochrechnung fehlender Daten dar. Die generelle Tendenz der Volumenverteilung ist im Diagramm gut erkennlich.

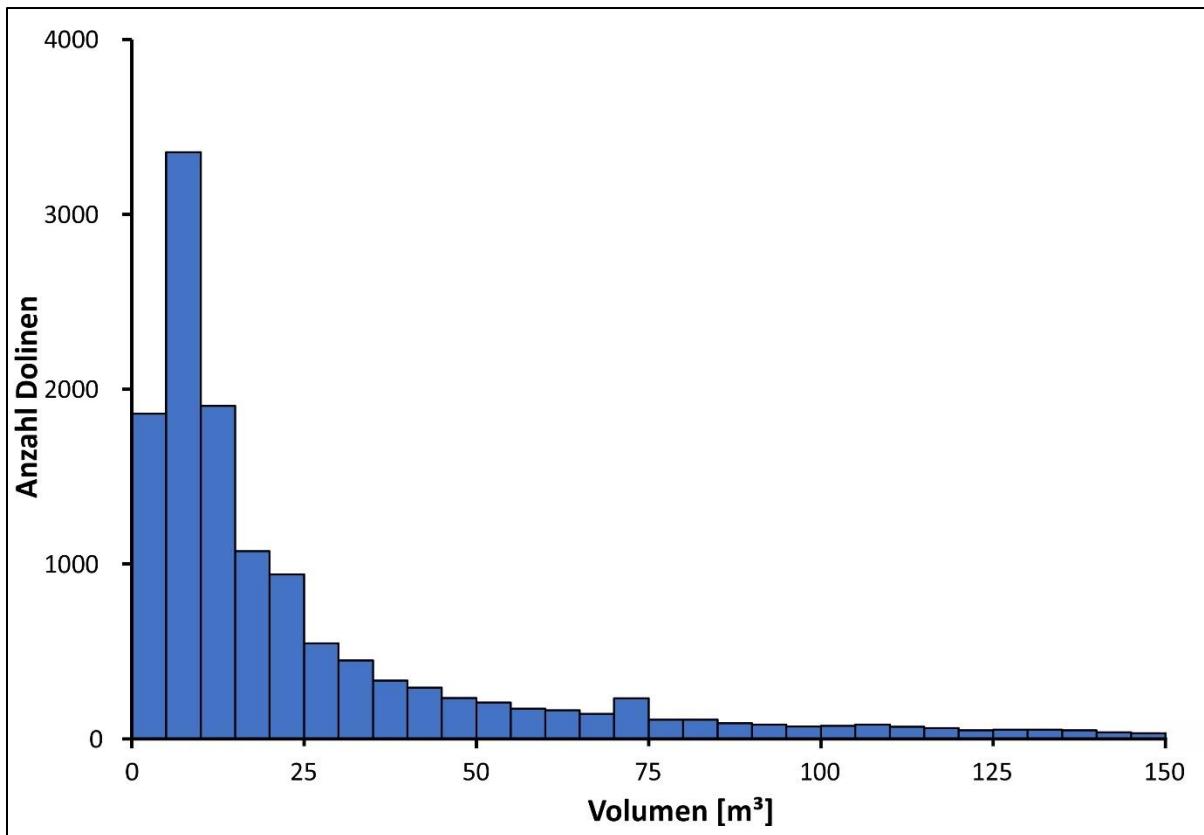


Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Dolinenvolumina, wobei die Klassenweite 5 m^3 beträgt.

5.4.1.4 Interpretation der statistischen Beschreibung der Dolinengeometrie

Die Häufigkeitsverteilung der drei geometrischen Dolinenparameter Tiefe, Fläche sowie Volumen zeigen deutlich, dass der Großteil der Dolinen eher kleinmaßstäblich bleibt. Primär wird eine Vielzahl an Klüften karstmorphologischen Prozessen ausgesetzt, wobei die positive Rückkopplung einiger schneller wachsenden Initialfugen dazu führt, dass diese mehr Wasser aufnehmen, wodurch sie sich schneller als umliegende Fugen und Flächen erweitern, beziehungsweise Gestein abtragen.

Eine weitere Erklärung der Dominanz kleinmaßstäblicher Dolinen liefert die Überprägung vieler Hochflächen durch glaziale Erosion im Zuge der pleistozänen Kaltzeiten, wonach die Bildung dieser Karstformen zum Teil wieder von vorne begann. Dies betrifft jedoch nur Dolinen, die in den vergletscherten Gebieten der pleistozänen Kaltzeiten liegen.

5.4.2 Räumliche Verteilung der Dolinen

Die Ermittlung der räumlichen Verteilung der Dolinen und deren Klassifizierung stellt eine quantitative Methode der Datenerhebung dar. Die erstellte Karte (Abb. 24) wird in Dolinen pro km^2 beschrieben, wobei die Werte im Untersuchungsgebiet von 0 bis 1073 Dolinen pro km^2 reichen und die Rottöne verschiedene Dolinendichte-Klassen widerspiegeln. Der für das gesamte Untersuchungsgebiet ermittelte Durchschnittswert beträgt 3,9 Dolinen pro km^2 .

Abbildung 24 A gibt einen Überblick der räumlichen Verteilung der Dolinen in der Gegend zwischen Puchenstuben und Annaberg. Der Maximalwert in diesem Gebiet liegt bei 115 Dolinen pro km^2 . Geologisch betrachtet ist dieses Teilgebiet heterogen, wobei Gutensteiner Kalk und Dolomit die

dominierende Lithologie darstellt und untergeordnet auch die Reifling-Formation und das Haselgebirge und die Werfen-Formation kartiert sind.

Das Dürrenstein-Plateau im SW NÖs (Abb. 24 B) weist die maximale Dichte an Dolinen im alpinen Raum NÖs auf, welche bei 1073 Dolinen pro km^2 liegt. Fast das gesamte, großteils von Dachsteinkalk aufgebaute Plateau weist eine Dichte von über 25 Dolinen pro km^2 auf.

Der Schneeberg (Abb. 24 C), auf welchem hauptsächlich Steinalm- und Wettersteinkalk aufgeschlossen sind, stellt ein dicht von Dolinen übersätes Plateau dar, wobei die Stelle mit der maximal gemessenen Dichte von 285 Dolinen pro km^2 am Hochschneeberg liegt.

Abgesehen von den drei näher betrachteten Gebieten zeigen auch weitere Gegenden auffällig hohe Dichten an Dolinen an. Am Hochkar beträgt die maximale Dolinendichte 400 Dolinen pro km^2 , auf der Feldwiesalm 250, am Scheibenberg 42, auf der Rax (nur NÖ-Anteil) 215, auf der Hohen Wand 17 (wobei die dort so zahlreichen Halbdolinen nicht berücksichtigt wurden) und am Trafelberg 18. Die erhöhten Werte von 235 Dolinen pro km^2 um das Gipswerk bei Puchberg am Schneeberg und 75 bei Heiligenkreuz sind an Haselgebirge und Werfen-Formation gebunden. Gipse sind auch nördlich des Ötschers im Bereich der Tormäuer kartiert und spiegeln sich auch dort in erhöhten Dichten an Karstformen wider.

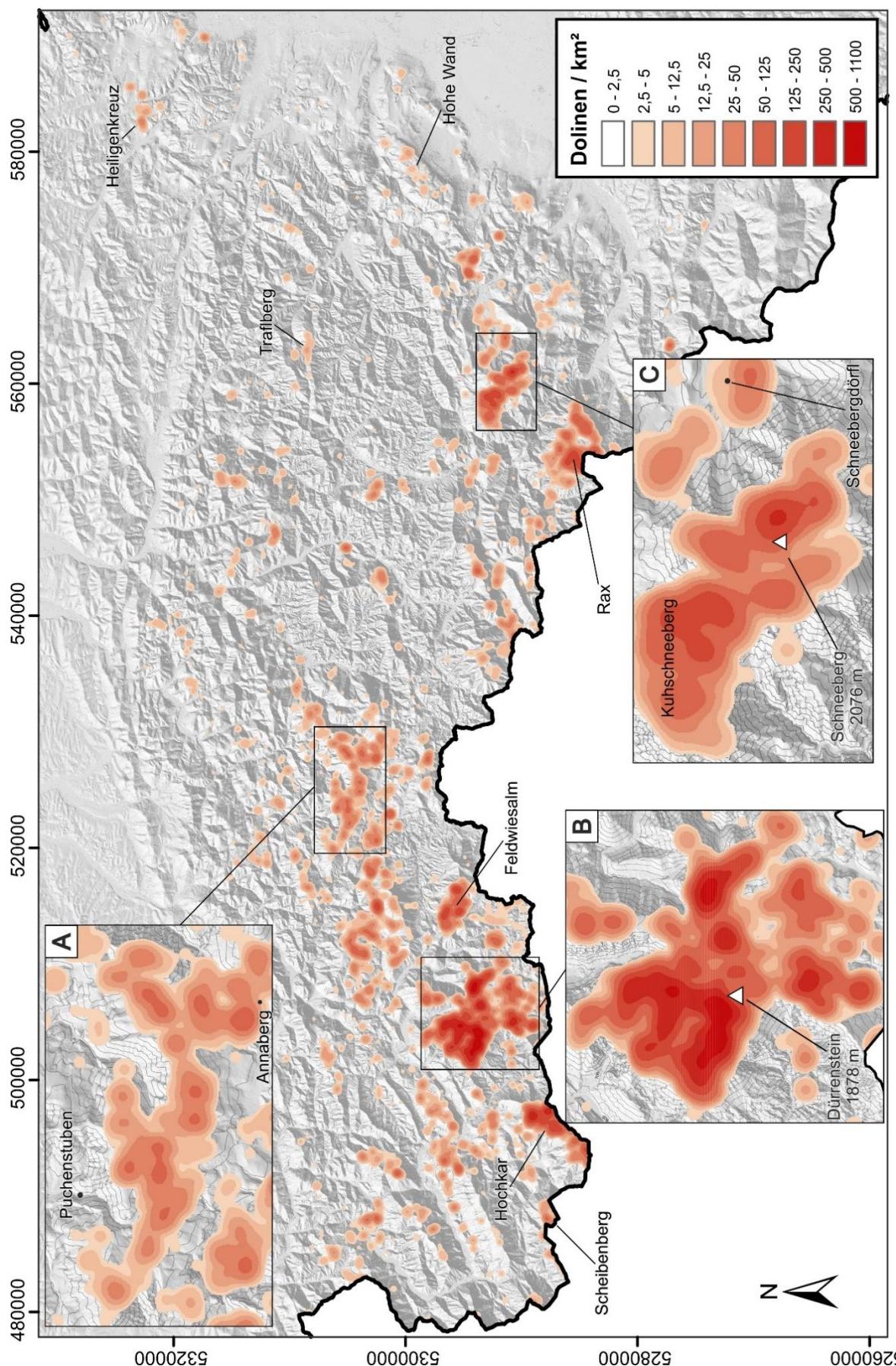


Abbildung 24: Karte des alpinen Raum Niederösterreichs, wobei mittels Kernel-Function die räumliche Verteilung der Dolinen ermittelt und farblich in einer nicht linearen Skala klassifiziert wurde. A) Gebiet um Puchenstuben bis Annaberg; B) Dürrenstein-Plateau; C) Schneeberg-Plateau. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: schattiertes ALS-Geländemodell.

5.4.3 Räumliche Verteilung der Dolinenvolumina

Die Ermittlung der räumlichen Verteilung der Dolinenvolumina und deren Klassifizierung stellt eine statistische Methode der Datenerhebung dar. Die erstellte Karte (Abb. 25) wird in Dolinenvolumen (in m^3) pro km^2 beschrieben, wobei das Maximum im Untersuchungsgebiet bei etwa 19 Mio. m^3 pro km^2 liegt. Die unterschiedlichen Farbtöne spiegeln den Anstieg an in Dolinen gelöstem Gestein wider. Einige Flächen zeichnen sich durch eine lokal erhöhte Lösungsrate aus, wodurch sich an diesen Stellen Dolinen ausgebildet haben. Gebiete, in denen das Lösungsvolumen einzelner Karstformen markant hoch ist, sind in der Karte gut ersichtlich. Dazu gehören neben Rax, Hochkar, Hoher Wand, Traflberg und Feldwiesalm auch die in den Kartenausschnitten (Abb. 25 A, B, C) detaillierter dargestellten Gebiete des Dürrensteins, der Gegend zwischen Puchenstuben und Annaberg sowie das Schneeberg-Plateau.

In der Gegend zwischen Puchenstuben und Annaberg (Abb. 25 A) zeigen sich einige Flächen mit einer erhöhten Volumendichte. Der Fläche maximaler Dichte im Zentrum des Kartenausschnitts wird ein Lösungsvolumen von 2 Mio. km^3 pro km^2 , den erhöhten Volumendichten um Annaberg und Reith eines von 0,3 Mio. km^3 pro km^2 zugeordnet. Dennoch handelt es sich bei diesem Kartenausschnitt, hinsichtlich der Volumendichte, nicht um den dominantesten Bereich im Untersuchungsgebiet.

Ein solches Gebiet stellt der Dürrenstein (Abb. 25 B) dar, wo ein Punkt beim Grünloch den Maximalwert von knapp 19 Mio. m^3 pro km^2 anzeigt. Generell kann im gesamten Dürrenstein-Plateau ein ziemlich hoher Volumenverlust in den Dolinen beobachtet werden, wobei dieser über eine doch große Fläche zumindest zwischen 0,05 und 0,125 Mio. m^3 pro km^2 beträgt.

Auch am Schneeberg (Abb. 25 C) kann ein erhöhter Wert (2,5 Mio. m^3 pro km^2) an gelöstem Gesteinsvolumen in den Dolinen beobachtet werden, wobei die dominante Fläche am Kuhschneeberg liegt, auf dem, wie bereits in Kapitel 5.3.4. beschrieben, einige große Dolinen ausgeprägt sind. Zudem ist zu erwähnen, dass sich auch am Hochschneeberg sowie im NE dessen gelegenen Tal ähnlich klassifizierte Flächen wiederfinden.

Um große Hohlformen am Scheibenbergs (westlich des Hochkars an der steirischen Landesgrenze) liegt die Volumendichte auf über 9 Mio. km^3 pro km^2 . Die weiteren maximalen Volumendichten betragen 0,9 Mio. km^3 pro km^2 am Hochkar, 4,4 auf der Feldwiesalm, 2,2 auf dem Rax-Plateau, 1,1 auf der Hohen Wand sowie 0,45 am Traflberg.

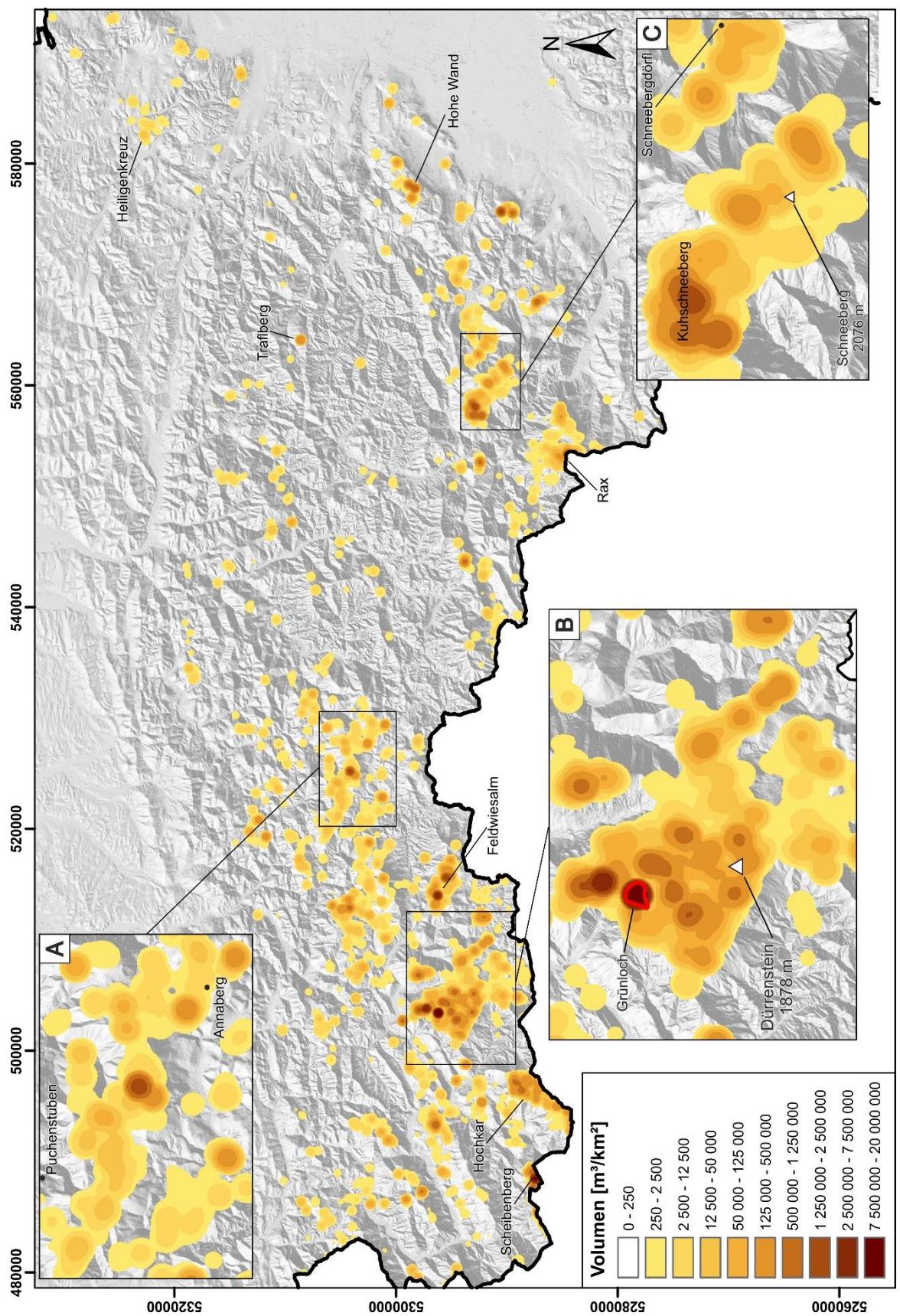


Abbildung 25: Karte des alpinen Raum Niederösterreichs, wobei mittels Kernel-Function die räumliche Verteilung der Volumina der Dolinen ermittelt und farblich in einer nicht-linearen Skala klassifiziert wurde. A) Gebiet um Puchenstuben bis Annaberg; B) Dürrenstein-Plateau mit Grünloch; C) Schneeberg-Plateau und Schneebergdörfli. Koordinaten: UTM 33 N; Hintergrund: schattiertes ALS-Geländemodell.

5.4.4 Interpretation der räumlichen Verteilung der Dolinen und Dolinenvolumina

Die räumliche Verteilung der Dolinendichte zeigt, dass die zwei im SW gelegenen Plateaus Dürrenstein und Hochkar eine deutlich stärkere Verkarstung an der Oberfläche aufweisen. Neben diesen beiden Plateaus zeigt auch die Feldwiesalm südlich des Ötschers, auf der ebenfalls Dachsteinkalk dominiert, eine erhöhte Dichte an Oberflächenkarstformen. Alle drei Gebiete sowie die ebenfalls von Dachsteinkalk aufgebaute Hohe Wand weisen zudem eine sehr hohe Volumendichte an gelöstem Gestein in Dolinen auf. Dies führt zur Annahme, dass der Dachsteinkalk ein vergleichsweise reines Kalkgestein darstellt, weshalb die Löslichkeit deutlich höher ist als etwa im Haupt- und Dachsteindolomit.

Dem Steinalm- und Wettersteinkalk, welcher auf Rax, Scheibenberg und Schneeberg großteils aufgeschlossen ist, wird anhand der berechneten Dolinendichte ebenfalls gute Verkarstungsfähigkeit attestiert. Wobei die Dichte an Dolinen mit 42 Dolinen pro km² am Scheibenberg vergleichsweise gering ist. Wie in Kapitel 5.4.3 beschrieben ist die Volumendichte an gelöstem Gestein in Dolinen auf den Plateaus der Rax, des Scheibbergs und des Schneebergs erhöht. Auffällig ist das große Volumen am Scheibenberg, was auf vermehrt große Formen auf diesem Plateau im Vergleich zu den beiden anderen Plateaus hindeutet. Der auf diesen Bergen anzutreffende Steinalm- und Wettersteinkalk stellt demnach ebenfalls eine Lithologie relativ reinen Kalksteins dar, wodurch die erhöhte Löslichkeit des Gesteins erklärt wird. Dennoch ist anzumerken, dass der Volumenverlust in den Dolinen dieser Plateaus geringer ausfällt als in den von Dachsteinkalk aufgebauten Plateaus, weshalb diesem ohne Berücksichtigung anderer Faktoren (Tektonik, Niederschlag und glaziale Geschichte) eine höhere Verkarstungsfähigkeit attestiert wird.

Die räumliche Verteilung der Dolinen in der Gegend zwischen Puchenstuben und Annaberg weist keine vergleichbar hohen Dichten wie etwa am Dürrenstein-Plateau auf. Laut geologischer Karte und der Masterarbeit von Winkler (2019) sind diese sowie die erhöhten Werte in Puchberg am Schneeberg, nördlich des Ötschers / Tormäuers und Heiligenkreuz, an Haselgebirge und Werfen-Formation gebunden. Auch in diesen Gebieten wird eine hohe Dichte an Dolinenvolumina festgestellt.

5.4.5 Pitting Index

Eine einfache Möglichkeit zur Ermittlung des Grades der Verkarstung auf und nahe der Oberfläche stellt der Pitting Index (R_p) dar. In Tabelle 8 sind die ermittelten R_p -Werte sowohl für das gesamte Untersuchungsgebiet als auch für fünf ausgewählte Gebiete, welche eine hohe Dichte an Karstformen aufweisen, angeführt, wobei auch diese Auswertung sich ausschließlich auf Dolinen bezieht. Die jeweilige Referenzfläche stellen die Plateaus, beziehungsweise im Gebiet zwischen Puchenstuben und Annaberg der Kartenausschnitt, dar.

Der ermittelte R_p -Wert für das gesamte Untersuchungsgebiet liegt bei 579. Tabelle 8 ist zu entnehmen, dass Dürrenstein-Plateau mit einem R_p -Wert von 14,0, gefolgt von Hochkar mit 16,2 die niedrigsten Werte aufweisen. Auf dem Schneeberg-Plateau beträgt der Pitting Index 34,7, ist also etwa doppelt so groß wie in den zuerst erwähnten Gebieten. Die Gegend um Annaberg mit einem R_p -Wert von 42,5 weist eine geringere Verbreitung an Dolinen auf, jedoch weist das Rax-Plateau mit 65,3 den höchsten Wert der ausgewählten fünf Gebiete auf. Der Reziprokwert, beziehungsweise der prozentuale Anteil der

Dolinenfläche an der Gesamtfläche eines Plateaus ist ebenfalls Tabelle 8 zu entnehmen. Mit 7,1 % ist dieser Anteil am Dürrenstein-Plateau am größten.

Tabelle 8: Der Pitting Index (Rp) ausgewählter Gebiete (Ausschnitte wie in 5.3) sowie des gesamten alpinen Raum NÖs. Der Reziproker Wert [1/Rp] des Pitting Index multipliziert mit 100 ergibt den prozentualen Anteil der Dolinenfläche an der Gesamtfläche.

Gebiet	Pitting Index Rp	[%]
Dürrenstein	14,0	7,1
Hochkar	16,2	6,2
Schneeberg	34,7	2,9
Puchenstuben - Annaberg	42,5	2,4
Rax	65,3	1,5
alpiner Raum NÖs	578,7	0,2

5.4.5.1 Interpretation des Pitting Index

Es ist festzuhalten, dass sich diese R_p -Werte lediglich auf Dolinen beziehen, Poljen und Glaziokarst-Hohlformen, welche große verkarstete Flächen darstellen, werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Auf der Rax wurden sieben Glaziokarst-Hohlformen aufgenommen, weshalb der rein auf Grundlage der Dolinen berechnete Pitting Index kein vollständiges Bild des Plateaus liefert. Die ermittelten R_p -Werte zeigen, dass auf den beiden, großteils von Dachsteinkalk aufgebauten Plateaus Hochkar und Dürrenstein, die stärkste Oberflächenverkarstung ausgebildet ist. Dieses Ergebnis untermauert die Annahme, dass Dachsteinkalk die Lithologie mit der stärksten Verkarstungsfähigkeit darstellt.

Unter Berücksichtigung des R_p -Wertes des Schneeberg-Plateaus wird festgestellt, dass die Dolinen im Steinalm- und Wettersteinkalk, im Vergleich zum Dachsteinkalk, nur etwa die Hälfte der Fläche einnehmen. Da nicht nur die Fläche für die Charakteristik der Verkarstung ausschlaggebend ist, kann diese Aussage alleine keine Grundlage zur Einschätzung der Verkarstungsfähigkeit der diversen Lithologien darstellen.

Im Gebiet zwischen Puchenstuben und Annaberg ist die Anzahl an Dolinen im Vergleich zu den anderen Ausschnitten deutlich geringer. Dass der R_p -Wert dennoch nicht deutlich von den anderen Gebieten abweicht, deutet daraufhin, dass die durchschnittliche Fläche der Dolinen in diesem Gebiet größer ist, was auf Gipskarst zurückzuführen ist. Die bedeutendste Karsthohlform dieses Gebiets, das Polje „Auf den Böden“, wurde nicht berücksichtigt.

5.4.6 Höhenverteilung der Dolinen

Die statistische Auswertung der Verteilung der Dolinen in Bezug zur Seehöhe (Abb. 26) im alpinen Raum NÖs beruht auf der Einteilung in 50-m-Höhenintervalle. Die größte Fläche von 312 km² des alpinen Raum NÖs liegt auf einer Seehöhe zwischen 650 und 700 m. Generell weist die Höhenlage eine linkssteile Verteilungskurve auf, wobei der Großteil zwischen 400 und 1000 m Seehöhe liegt. Oberhalb dieser nimmt die Fläche stetig ab. Die Fläche, welche auf die Klasse von 1450 bis 1500 m Seehöhe entfällt, liegt bei 20 km².

Im Gegensatz dazu bildet die Verteilung der kartierten Dolinen in Bezug zur Seehöhe ein anderes Bild ab. Die meisten dieser Karstformen befinden sich auf einer Seehöhe zwischen 1400 und 1600 m, wobei das Maximum, mit 1672 Dolinen, zwischen 1450 bis 1500 m liegt. Auffällig erscheinen zudem die geringe Verbreitung in 1250 und 1750 m, sowie der Peak bei 1900 m. Die Verteilung der Dolinen in Bezug zur Seehöhe weist im Vergleich zur Verteilung der Seehöhen ein relativ inhomogenes Bild auf.

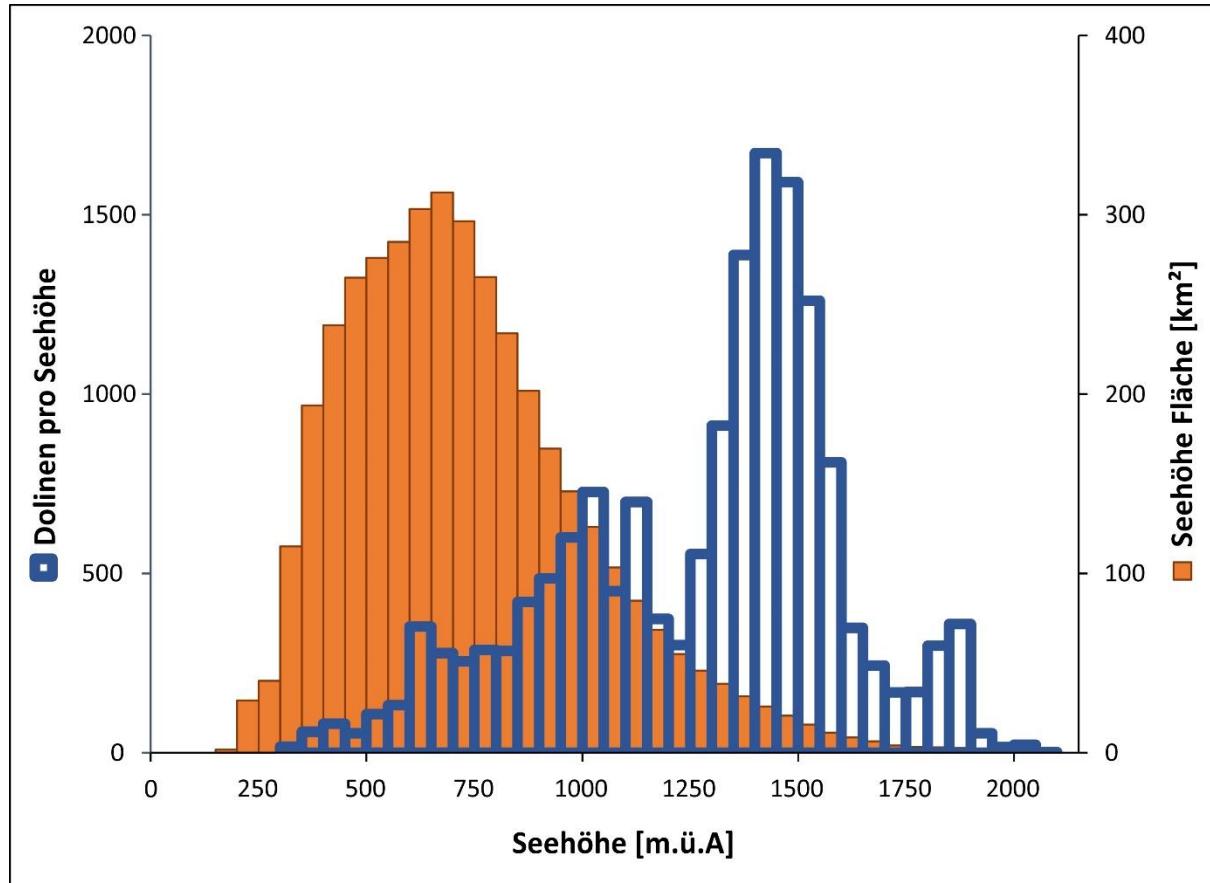


Abbildung 26: Linke Achse: Häufigkeitsverteilung der Dolinen im alpinen Raum Niederösterreichs in Bezug zur Seehöhe. Rechte Achse: Verteilung der Flächen im alpinen Raum Niederösterreichs in Bezug zur Seehöhe. Dabei sind die Seehöhen in 50-m-Intervalle unterteilt.

5.4.6.1 Interpretation der Höhenverteilung der Dolinen

Die allgemeine Verteilung der Seehöhen im Untersuchungsgebiet erscheint homogen, korreliert aber nicht mit der Anzahl an Dolinen pro Seehöhe. Das österreichische Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie (1998) beschrieb die Seehöhe als einen der Faktoren, welcher Einfluss auf den Anstieg des Niederschlags hat. Tendenziell steigt die Häufigkeit an Dolinen mit ansteigender Seehöhe, wobei sich die größte Anzahl an Dolinen zwischen 1400 und 1600 m befindet. Dies unterstreicht somit den Einfluss der Seehöhe auf den Niederschlag und die Ausbildung von Oberflächenkarstformen.

Die geringere Ausbreitung an Dolinen in etwa 1750 m kann durch die Überprägung dieser Flächen im Zuge der pleistozänen Kaltzeiten erklärt werden. Jedoch wird diese Erklärung durch den Peak in 1800 bis 1900 m nicht unterstützt. Die geringe Häufigkeit der Dolinen zwischen 1200 und 1250 m kann nicht erklärt werden.

5.5. Karstformen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien

Bei der Analyse der Häufigkeit der Karstformen in Bezug zum geologischen Setting wurden die bereits erwähnten Lithologien, die als nicht bis kaum verkarstungsfähig gelten, nicht berücksichtigt. In den folgenden Kapiteln werden die statistisch ermittelten Werte der unterschiedlichen Karstformen je Lithologie angeführt und beschrieben.

5.5.1 Verteilung der Poljen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien

Zwei Poljen haben sich in Steinalm- und Wettersteinkalk ausgebildet, je eine weitere in Dachsteinkalk, Gutensteiner Kalk und Dolomit sowie Haupt- und Dachsteindolomit. Aufgrund der geringen Menge an Poljen im Untersuchungsgebiet wird kein kausaler Zusammenhang zwischen zugrundeliegender Lithologie und dessen Bildung geschlossen.

5.5.2 Verteilung der Glaziokarst-Hohlformen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien

Glaziokarst-Hohlformen sind aufgrund ihrer polygenetischen Entstehung und der Bildung von Moränenwällen oft schwer als solche zu identifizieren. Außerdem fällt die Zuordnung zu anstehendem Gestein oft nicht leicht, weshalb vier der aufgenommenen Hohlformen nicht zugeordnet werden konnten. Diese Karstformen sind vor allem auf den hochgelegenen Plateaus kartiert, die in den pleistozänen Kaltzeiten von Gletschern überprägt wurden. Jeweils drei Glaziokarst-Hohlformen entstanden im Dachsteinkalk sowie im Steinalm- und Wettersteinkalk, je eine Hohlform hat sich in Grafensteigkalk und Oberrhät-Riffkalk ausgebildet.

5.5.3 Häufigkeit der Dolinen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien

Ein Hauptaugenmerk dieser Arbeit gilt den Dolinen, welche mit 15.459 die prominentesten Karstformen darstellen. Die unterschiedliche Häufigkeit dieser in den verkarstungsfähigen Lithologien ist Tabelle 9 zu entnehmen.

In den Diagrammen (Abb. 27 A, B, C) sind die unterschiedlichen Häufigkeiten der kartierten Dolinen in Bezug zu den verkarstungsfähigen Lithologien dargestellt.

In Abbildung 27 A ist die Häufigkeitsverteilung der Dolinen mit einem Durchmesser < 25 m dargestellt. In absoluten Zahlen stellt der Dachsteinkalk, mit 38 % dieser Karsthohlformen, die Lithologie mit der meisten Verkarstung auf und nahe der Oberfläche dar. Mit 14 %, beziehungsweise mit 10 % folgen der Steinalm- und Wettersteinkalk sowie der Haupt- und Dachsteindolomit. Weitere stratigraphische Einheiten mit einigen hunderten Dolinen stellen Haselgebirge und Werfen-Formation, Oberseebrekzie sowie Gutensteiner Kalk und Dolomit dar. Die Oberseebrekzie weist für ihre flächenmäßig geringe Ausbreitung eine beachtlich hohe Anzahl an Dolinen mit Durchmessern < 25 m auf.

Im Vergleich dazu können bei der Verteilung der Dolinen mit einem Durchmesser ≥ 25 m (Abb. 27 B) einige Unterschiede beobachtet werden. Zwar sind mit 30 % dieser Dolinen auch in diesem Fall die Meisten im Dachsteinkalk ausgebildet, jedoch ist der Steinalm- und Wettersteinkalk mit 21 % deutlich stärker vertreten als bei den kleineren Dolinen. Die Einheiten des Haupt- und Dachsteindolomits sowie des Haselgebirges und der Werfen-Formation zeigen prozentual gesehen auch bei den größeren Karsthohlformen ähnliche Häufigkeiten. Im Gutensteiner Kalk und Dolomit hingegen ist die Häufigkeit

der Dolinen ≥ 25 m, prozentual betrachtet, deutlich prominenter vertreten. Eine ähnliche Tendenz ist auch für Plattenkalk und Opponitz-Formation zutreffend. Im Gegensatz dazu wird beobachtet, dass die größeren Dolinen in der Oberseebrekzie seltener auftreten.

Tabelle 9: Häufigkeit der Dolinen in Bezug zu den verkarstungsfähigen Lithologien. D ... Doline. Lithologien mit signifikanten Unterschieden zwischen $D < 25$ m und $D \geq 25$ m sind gelb hinterlegt.

Lithologie	D < 25 m	%	D ≥ 25 m	%	Gesamt	%
Dachsteinkalk	5.528	38,4	314	30,0	5.842	37,8
Steinalm- und Wettersteinkalk	2.064	14,3	218	20,8	2.282	14,8
Haupt- und Dachsteindolomit	1.502	10,4	110	10,5	1.612	10,4
Haselgebirge und Werfen-Formation	1.357	9,4	90	8,6	1.447	9,4
Oberseebrekzie	1.142	7,9	23	2,2	1.165	7,5
Gutensteiner Kalk und Dolomit	822	5,7	104	9,9	926	6,0
verkarstungsfähige Jura i.A.	434	3,0	21	2,0	455	2,9
Plattenkalk	364	2,5	60	5,7	424	2,7
Opponitz-Formation	370	2,6	43	4,1	413	2,7
Wettersteindolomit	331	2,3	15	1,4	346	2,2
Oberrät-Riffkalk	157	1,1	15	1,4	172	1,1
Raminger Kalk	93	0,6	7	0,7	100	0,6
Reifling-Formation	78	0,5	15	1,4	93	0,6
Metakarbonate der Mitteltrias i.A.	54	0,4	2	0,2	56	0,4
Plassenkalk	55	0,4	3	0,3	58	0,4
Karbonatisches Baden	24	0,2	3	0,3	27	0,2
Grafensteigkalk	20	0,1	2	0,2	22	0,1
Rauhwacke	13	0,1	1	0,1	14	0,1
Hallstätter Fazies	4	0	1	0,1	5	0
					15.459	100,0

Werden alle kartierten Dolinen des alpinen Raum NÖs betrachtet (Tab. 9), zeigt sich, dass 71,2 % in reinen Kalklithologien liegen, 12,6 % in reinen Dolomitgesteinen, 9,4 % in den Gipsen des Haselgebirges und der Werfen-Formation, sowie 6 % im Gutensteiner Kalk und Dolomit. Mit 38 % aller Dolinen sind die meisten aller Dolinen im Dachsteinkalk ausgebildet. Mit 15 % und 10 % folgen der Steinalm- und Wettersteinkalk sowie Haupt- und Dachsteindolomit. In Haselgebirge und Werfen-Formation werden 9 %, in der Oberseebrekzie 8 % aller Dolinen gezählt.

Wie Tabelle 9 außerdem zu entnehmen ist, sind Gutensteiner Kalk und Dolomit, die verkarstungsfähigen Gesteine der Jura im Allgemeinen, der Plattenkalk, die Opponitz-Formation, der Wettersteindolomit, etc. bei der Bildung von Karsthohlformen weniger prominent vertreten.

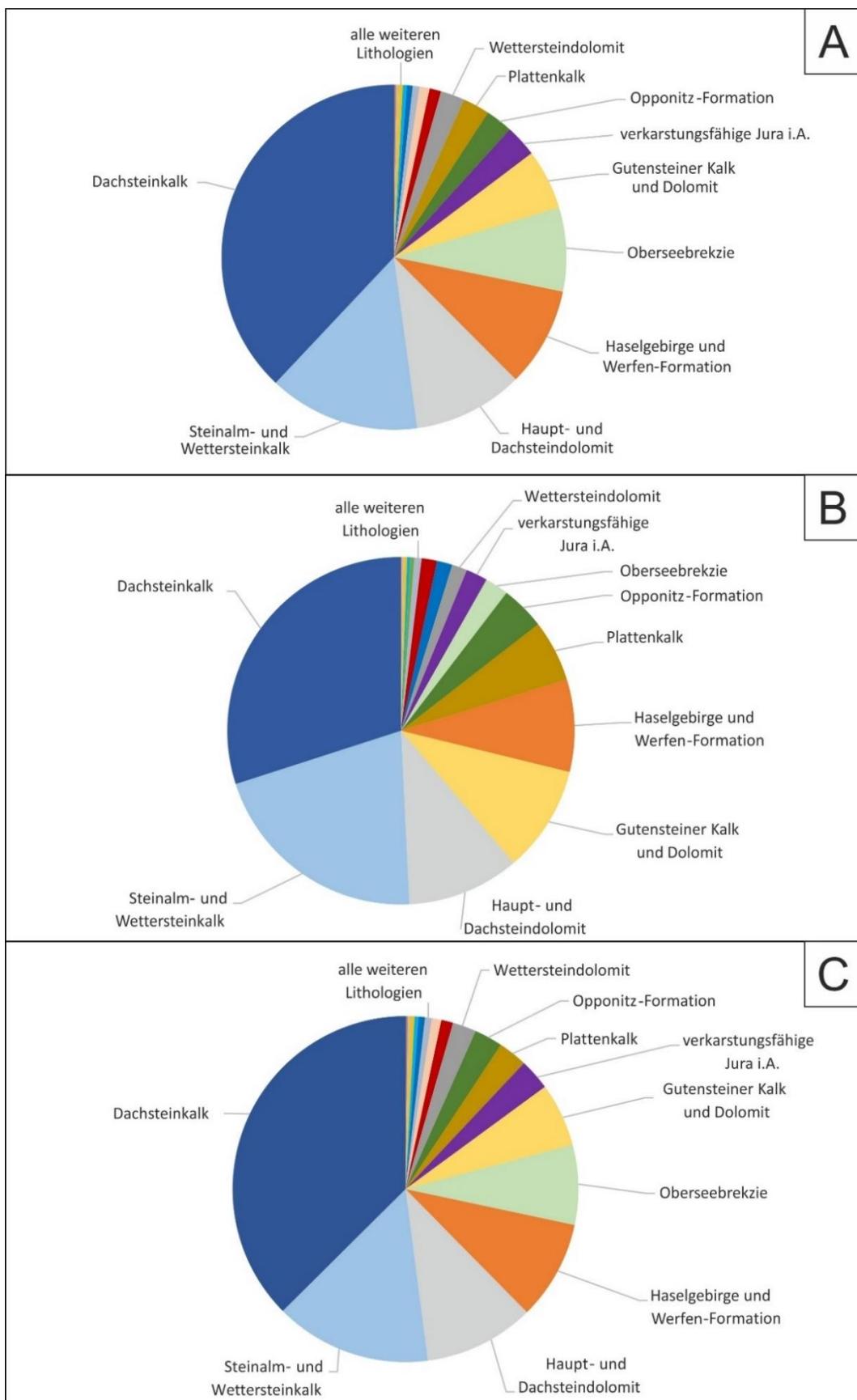


Abbildung 27: Prozentuale Verteilung der Dolinen im alpinen Raum Niederösterreichs in Bezug zu den verkarstungsfähigen Lithologien. 18 A ... Prozentuale Verteilung der Dolinen mit Durchmessern kleiner 25 m; 18 B ... Prozentuale Verteilung der Dolinen mit Durchmessern größer gleich 25 m; 18 C ... Prozentuale Verteilung aller Dolinen.

5.5.3.1 Normierte Häufigkeit der Dolinen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien

Auf Grundlage des Datensatzes an Karsthohlformen wurde die normierte Anzahl an Dolinen statistisch ermittelt, wobei die Werte in Bezug zu den diversen verkarstungsfähigen stratigraphischen Einheiten gesetzt wurden (Tab. 10).

Im Mittel sind im alpinen Raum NÖs 3,9 Dolinen pro km² ausgebildet. Mit 167 Dolinen pro km² wird die mit Abstand größte Dichte in der Oberseebrekzie beobachtet. Dahinter folgen mit 40 und 24 Dolinen pro km² der Dachsteinkalk sowie Haselgebirge und Werfen-Formation. Weitere stratigraphische Einheiten, deren Dichte pro Einheitsfläche signifikant über dem landesweiten Mittel liegen, sind die Gesteine der verkarstungsfähigen Jura im Allgemeinen (14), der Steinalm- und Wettersteinkalk (12) und der Plattenkalk (10).

Tabelle 10: Normierte Häufigkeit der Dolinen des Untersuchungsgebietes in Bezug zur Lithologie.

Lithologie	Anzahl/km ²
Oberseebrekzie	166,7
Dachsteinkalk	40,4
Haselgebirge und Werfen-Formation	24,3
verkarstungsfähige Jura i.A.	14,3
Steinalm- und Wettersteinkalk	11,6
Plattenkalk	9,9
Oberrät-Riffkalk	6,6
Grafensteigkalk	6,1
Plassenkalk	5,5
Gutensteiner Kalk und Dolomit	4,3
Raminger Kalk	3,8
Reifling-Formation	2,9
Opponitz-Formation	2,8
Haupt- und Dachsteindolomit	1,7
Karbonatisches Baden	1,3
Wettersteindolomit	1,0
Metakarbonate der Mitteltrias i.A.	1,0
Rauhwacke	0,8
Hallstätter Fazies	0,6
Allgemein NÖ	3,9

5.5.3.2 Interpretation der Häufigkeit der Dolinen in Bezug zu verkarstungsfähigen Lithologien

Die quantitativen Verteilungen der Verkarstung selbst lassen noch kein Fazit bezüglich eines Zusammenhangs zwischen Lithologie und Ausmaß der Verkarstung zu. Für eine repräsentative Aussage bedarf es zudem noch der normierten Häufigkeit der Dolinen. Wird diese in Betracht gezogen, stellt sich heraus, dass die stärkste Verkarstung in der Oberseebrekzie beobachtet wird. In absoluten Zahlen befinden sich die meisten Dolinen zwar im Dachsteinkalk, dennoch erscheint die normierte Häufigkeit

dieser Lithologie weniger verkarstungsfähig. Der Dachsteinkalk weist nach der Oberseebrekzie die zweitmeist normierte Häufigkeit an Dolinen auf.

Da die Oberseebrekzie nur sehr lokal am hochalpinen Dürrenstein-Plateau vorkommt, auf dem viel Niederschlag fällt, und lediglich 0,3 % der Fläche einnimmt, wird diese als statistischer Ausreißer betrachtet. Der Umstand, dass der Anteil der Dolinen mit Durchmessern ≥ 25 m vergleichsweise gering ausfällt, ist auf die begrenzte Verbreitung der Oberseebrekzie zurückzuführen, welcher nur am Plateau östlich des Dürrensteins aufgeschlossen liegt. Dieses Plateau wurde glazial überprägt, weshalb viele präglaziale Formen teilweise oder ganz wegerodiert wurden. Aus diesem Grund sind in der Oberseebrekzie großteils Dolinen mit Durchmessern < 25 m kartiert.

Wird also die normierte Häufigkeit der Dolinen je Lithologie miteinbezogen, verändert sich die Reihung der verkarstungsfähigen Lithologien. Die erhöhte Anzahl im Haselgebirge und Werfen-Formation erscheint plausibel, da sie Gipse enthält, welche um ein Vielfaches löslicher sind als Karbonate. Diese Auswertung dürfte das tatsächliche Gipsausmaß dennoch unterrepräsentieren, da damit zu rechnen ist, dass viele Gipsdolinen nicht erfasst sind, weil sie oft in Tallage zu finden sind und daher zum Teil bei der Landnutzung zugeschüttet werden. Umgekehrt ist anzunehmen, dass unter den kartierten Dolinen durch Untertage Gipsabbau induzierte Pingen enthalten sind.

Beachtlich erscheint, dass die normierte Häufigkeit der Dolinen in den Gesteinen der verkarstungsfähigen Jura i.A. höher als im Steinalm- und Wettersteinkalk ist, obwohl auf dem Rax- als auch auf dem Schneeberg-Plateau, welche großteils aus letztgenannter Lithologie aufgebaut werden, eine bedeutende Menge an Dolinen kartiert wurde.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die ungleiche flächenmäßige Verteilung der unterschiedlichen Lithologien die tatsächliche Verkarstungsfähigkeit des Gesteins etwas verzerrt. In Kombination mit der normierten Berechnung der Häufigkeit an Dolinen ergibt sich ein aufschlussreiches Bild über die Verkarstungsfähigkeit der Lithologien, wobei die ermittelte normierte Häufigkeit an Dolinen in der Oberseebrekzie als überschätzt gilt und als statistischer Ausreißer betrachtet wird.

5.5.4 Ponore

Die Gesamtzahl beobachteter Ponore in den Gesteinen des alpinen Raum NÖs beträgt 248. Ohne wasserstauende Gesteine oder Lockersedimente wie Paläoböden wird die Bildung von Ponoren selbst in gut verkarstungsfähigen Gesteinen kaum auftreten. Die statistisch ermittelten Anzahlen beziehen sich auf die verkarstungsfähigen Lithologien und sind in Tabelle 11 festgehalten. Die genaue Zuweisung zur Lithologie war in einigen Fällen nicht eindeutig, da Ponore, wie bereits in Kapitel 3.4.2. erwähnt, in vielen Fällen im Bereich von Schichtgrenzen entstehen.

Die meisten Ponore werden im Dachsteinkalk und im Gutensteiner Kalk und Dolomit beobachtet. Viele Formen sind zudem in der Opponitz-Formation, dem Haupt- und Dachsteindolomit sowie dem Steinalm- und Wettersteinkalk kartiert. Die prozentuale Verteilung kann dem nachstehenden Diagramm entnommen werden (Abb. 28).

Tabelle 11: Anzahl an Ponoren gereiht nach Lithologie (linke Tabelle), sowie gereiht nach der normierten Häufigkeit der Ponore je km² (rechte Tabelle).

Lithologie	Ponore	Lithologie	Ponore / km ²
Dachsteinkalk	53	Oberseebrekzie	1,86
Gutensteiner Kalk und Dolomit	44	Plassenkalk	0,85
Opponitz-Formation	26	Grafensteigkalk	0,56
Haupt- und Dachsteindolomit	21	verkarstungsfähige Jura i.A.	0,47
Steinalm- und Wettersteinkalk	20	Dachsteinkalk	0,37
verkarstungsfähige Jura i.A.	15	Reifling-Formation	0,22
Oberseebrekzie	13	Gutensteiner Kalk und Dolomit	0,20
Haselgebirge und Werfen-Formation	11	Haselgebirge und Werfen-Formation	0,18
Plassenkalk	9	Opponitz-Formation	0,18
Wettersteindolomit	8	Raminger Kalk	0,15
Reifling-Formation	7	Plattenkalk	0,12
Metakarbonate der Mitteltrias i.A.	6	Metakarbonate der Mitteltrias i.A.	0,11
Plattenkalk	5	Steinalm- und Wettersteinkalk	0,10
Raminger Kalk	4	Oberrät-Riffkalk	0,08
Grafensteigkalk	2	Rauhwacke	0,06
Oberrät-Riffkalk	2	Karbonatisches Baden	0,05
Karbonatisches Baden	1	Wettersteindolomit	0,02
Rauhwacke	1	Haupt- und Dachsteindolomit	0,02
Hallstätter Fazies	0	Hallstätter Fazies	0
Gesamt	248	Mittel	0,06

Die normierte Häufigkeit der Ponore weicht von dieser Beobachtung ab und weist die Oberseebrekzie als Lithologie mit der höchsten Ponanzahl je km² aus. Dahinter folgen weitere flächenmäßig gering verbreitete Lithologien wie etwa Plassenkalk, Grafensteigkalk, die Gesteine der verkarstungsfähigen Jura i.A. und erst danach der Dachsteinkalk. Hinsichtlich dieser normierten Häufigkeit erscheint die Bildung von Ponoren in allen weiteren Lithologien gering. Die mittlere normierte Häufigkeit an Ponoren im alpinen Raum NÖs beträgt 0,06.

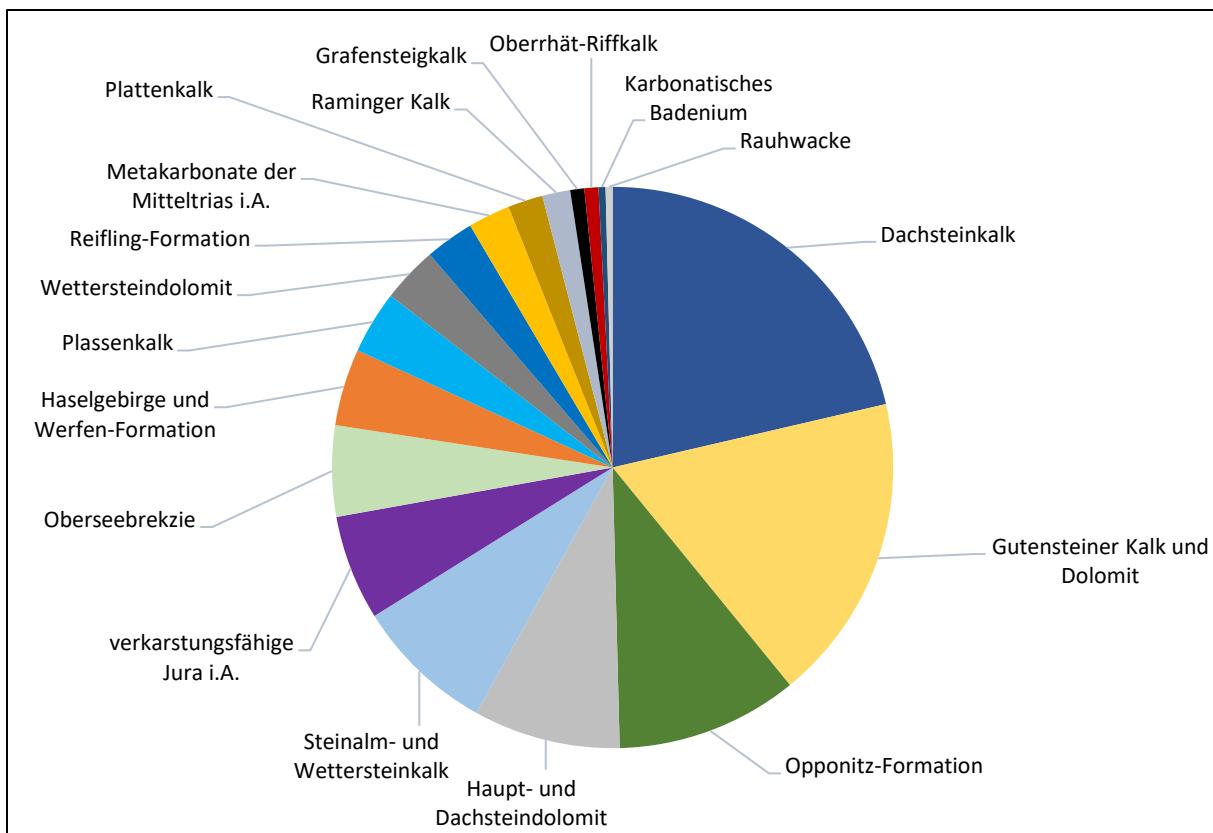


Abbildung 28: Prozentuale Verteilung der Ponore in Bezug zu den verkarstungsfähigen Lithologien.

5.5.4.1 Interpretation der Ponore

Aus den quantitativen Ergebnissen lässt sich schließen, dass Dachsteinkalk sowie Gutensteiner Kalk und Dolomit Lithologien darstellen, in welchen sich vermehrt Ponore bilden. Wird lediglich dieses Ergebnis in Betracht gezogen, deutet dies auf gute Verkarstungseigenschaften hin. Die normierte Häufigkeit, welche die Verbreitung der stratigraphischen Einheiten berücksichtigt, zeigt auf, dass vor allem in den Gesteinen der Oberseebrekzie und des Plassenkalks vermehrte Ausbildungen an Ponoren auftreten, wobei diese Auswertungen aufgrund der geringen Verbreitung dieser Lithologien als statistische Ausreißer betrachtet werden. Es ist zu beachten, dass die Identifikation der zugrundeliegenden Lithologien an den Schichtgrenzen teilweise nicht eindeutig erscheint und auch wasserstauende Gesteine wichtig für die Bildung von Ponoren sind. Aufgrund der schwierigen Identifikation der zugrundeliegenden Lithologie sowie der nicht allzu großen Datenmenge ist dieser statistischen Auswertung der Ponore mäßige Aussagekraft hinsichtlich der Einordnung der Verkarstungsfähigkeit der diversen Lithologien zuzuschreiben.

5.5.5 Karrenvorkommen

Insgesamt wurden 900 Punkte des alpinen Raum NÖs als Karrenvorkommen kartiert. Dieser Wert spiegelt die tatsächliche Anzahl nicht wider, sondern unterschätzt diese deutlich. Für ein komplettes Bild müsste die Zeit im Gelände um ein Vielfaches ausgedehnt werden. Die beobachteten Karrenvorkommen wurden den diversen verkarstungsfähigen Lithologien zugeordnet, die absoluten Zahlen sind in Tabelle 12 festgehalten. Mit 294 Karrenvorkommen liegen die meisten im Steinalm- und

Wettersteinkalk. Dahinter folgen mit 228 Karrenvorkommen der Dachsteinkalk und mit 81 Karrenvorkommen der Haupt- und Dachsteindolomit.

Tabelle 12: Häufigkeiten der Karrenvorkommen in den verkarstungsfähigen Lithologien in absoluten Zahlen.

Lithologie	Karren
Steinalm- und Wettersteinkalk	294
Dachsteinkalk	228
Haupt- und Dachsteindolomit	81
Plattenkalk	61
Oberrhät-Riffkalk	59
Gutensteiner Kalk und Dolomit	39
Plassenkalk	38
Raminger Kalk	35
verkarstungsfähige Jura i.A.	21
Opponitz-Formation	16
Wettersteindolomit	12
Reifling-Formation	7
Karbonatisches Baden	6
Haselgebirge und Werfen-Formation	3
Grafensteigkalk	0
Hallstätter Fazies	0
Metakarbonate der Mitteltrias i.A.	0
Oberseebrekzie	0
Rauhwacke	0
Gesamt	900

Das Diagramm (Abb. 29) stellt die prozentuale Verteilung der Karrenvorkommen in Bezug zu den verkarstungsfähigen Lithologien dar. Dieses zeigt, dass etwa ein Drittel der kartierten Karrenvorkommen im Steinalm- und Wettersteinkalk sowie ein weiteres Viertel im Dachsteinkalk, liegen. In allen weiteren Lithologien wurden weniger als 100 der Karrenvorkommen aufgenommen.

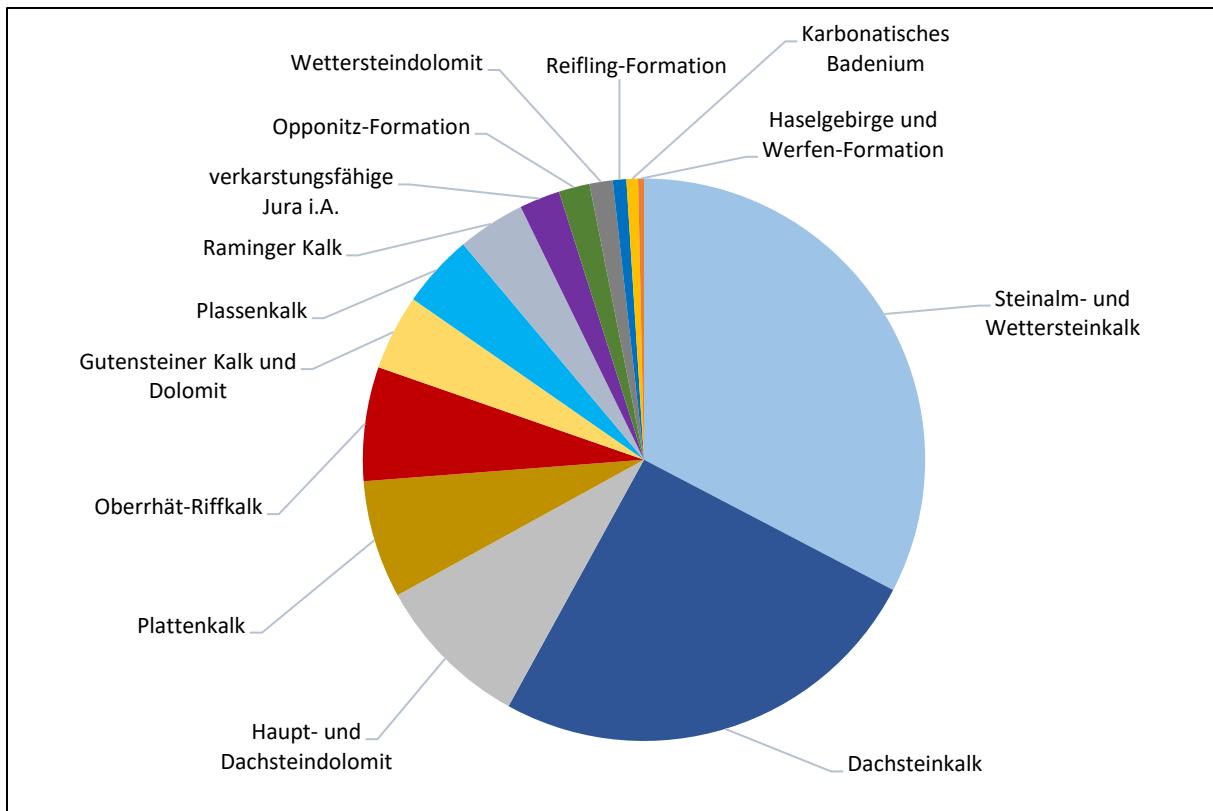


Abbildung 29: Prozentuale Verteilung aller Karrenvorkommen in Bezug zu den verkarstungsfähigen Lithologien.

5.5.5.1. Interpretation der Karrenvorkommen

Die Anzahl der kartierten Karrenvorkommen des Untersuchungsgebietes stellt ein Artefakt dar. Es ist davon auszugehen, dass der beschriebene Wert die eigentliche Verbreitung deutlich unterschätzt. Dies liegt hauptsächlich daran, dass nicht alle Gebiete hinsichtlich der Karrenvorkommen begangen werden konnten und es keine Möglichkeit der Fernerkundung gibt.

Auf den Plateaus der Rax und des Schneeberges wurden die Karrenvorkommen einigermaßen flächendeckend aufgenommen, während diese beispielsweise am Dürrenstein nicht flächendeckend kartiert sind. Werden lediglich die kartierten Karrenvorkommen zur Analyse einbezogen, ergibt sich folgendes semiquantitatives Ergebnis. Die vermehrte Bildung von Karrenvorkommen wird im Steinalm- und Wettersteinkalk sowie dem Dachsteinkalk beobachtet. Demnach werden diese beiden Lithologien als oberflächlich gut verkarstungsfähige Gesteine klassifiziert.

Im Gelände wurden subkutane und freiliegende Formen unterschieden. Da Letztere hauptsächlich in höheren Gebieten oberhalb der Baumgrenze oder auf steilen Hängen und subkutane Strukturen unter Bodenbedeckung entstehen, ist die Ausprägung primär von der Höhenlage abhängig. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit gilt jedoch anderen Karstformen. Würde eine detailliertere Arbeit in dieser Fragestellung angestrebt, so wäre zum Erhalt eines aussagekräftigen Ergebnisses ein Detailausschnitt, beispielsweise das Hochkar-Plateau, als Forschungsgebiet sinnvoller. Zudem würde es sich anbieten, einen möglichen Zusammenhang der beiden unterschiedenen Karrenformen zur Seehöhe zu untersuchen.

6. Diskussion und Schlussfolgerung

Karsthohlformen sind im alpinen Raum NÖs vor allem in den NKA weit verbreitet. Die statistischen Auswertungen von Dolinen werden, aufgrund der großen Datenmenge, als zentrales Argument zur semiquantitativen Klassifizierung der Verkarstungsfähigkeit der beschriebenen Lithologien herangezogen, welche eine der Hauptaussagen dieser Arbeit darstellt und in Tabelle 13 festgehalten ist. Unter den verkarstungsfähigen Gesteinen sind Kalk und Dolomit am weitesten verbreitet, wobei die Gipse des Haselgebirges und Werfen-Formation regional ebenfalls von großer Bedeutung sind.

In den Dolomitgesteinen, welche flächenmäßig am weitesten verbreitet sind, ist die Ausbildung von Karstformen vergleichsweise geringer als in den Kalken. Die Lithologie des Haupt- und Dachsteindolomits nimmt zwar über ein Drittel der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes ein, zusammen mit dem Wettersteindolomit sogar die Hälfte, dennoch liegt der Anteil an den beobachteten Dolinen bei lediglich 10 %, beziehungsweise 12 %, weshalb sie als Lithologien mit mäßiger, beziehungsweise geringer Verkarstungsfähigkeit charakterisiert werden.

Tabelle 13: Semiquantitative Klassifizierung der Häufigkeit von Karstformen in unterschiedlichen Lithologien. XXXX ... extrem häufig; XXX ... häufig; XX ... etliche; X ... wenige; - ... kaum bis keine; Verwendete Abkürzungen: Dol. ... Doline.

Lithologie	Dol. < 25 m	Dol. ≥ 25 m	Karren	Ponore
Dachsteinkalk	XXX	XXX	XXX	XXX
Grafensteigkalk	X	X	-	XX
Gutensteiner Kalk und Dolomit	XX	XXX	X	XXX
Hallstätter Fazies	-	-	-	-
Haselgebirge und Werfen-Formation	XXXX	XXXX	-	XXX
Haupt- und Dachsteindolomit	XX	XX	X	-
Karbonatisches Baden	-	-	X	-
Metakarbonate der Mitteltrias i.A.	-	-	-	X
Oberrät-Riffkalk	X	XX	XXX	-
Oberseebrekzie	XXX	XX	-	XXX
Opponitz-Formation	XX	XX	X	XX
Plassenkalk	X	X	XXX	XXX
Plattenkalk	XX	XX	XX	X
Raminger Kalk	X	X	XX	X
Rauhwacke	X	X	-	-
Reifling-Formation	X	XX	-	XX
Steinalm- und Wettersteinkalk	XXX	XXX	XXX	XX
verkarstungsfähige Jura i.A.	XXX	XX	X	XXX
Wettersteindolomit	X	X	-	X

Keine der in Kapitel 5.4.2 beschriebenen markant hohen Dolinendichten des alpinen Raum NÖs fällt auf Gebiete, in denen Dolomit kartiert ist. Mihevc und Mihevc (2021) stellten für Slowenien ebenfalls fest, dass die Dolinendichte in den Dolomitgesteinen niedriger als in Kalksteinen ist. Palmer (2007)

beschreibt Dolomit zwar als besser löslich als Kalk, jedoch werden aufgrund der langsameren Lösungskinematik sowie den schlechteren mechanischen Eigenschaften weniger Karstformen darin ausgebildet. Die erhöhte Klüftigkeit führt dazu, dass etwa die Frostverwitterung gegenüber der Gesteinslösung der dominante Prozess ist, weshalb nur wenige Karstformen ausgebildet bzw. erhalten werden.

Das Haselgebirge und die Werfen-Formation werden aufgrund der guten Löslichkeit und erhöhten Lösungskinematik der Gipse als extrem verkarstungsfähig klassifiziert. Diese Lithologie ist eher lokal verbreitet, enthält aber eine Vielzahl an Karstformen. Die meisten Karstformen werden im Dachsteinkalk beobachtet, welcher deutlich weniger Fläche des Untersuchungsgebietes einnimmt, jedoch 38 % aller Dolinen birgt. Gemeinsam mit Steinalm- und Wettersteinkalk liegen mehr als die Hälfte der Karsthohlformen in diesen beiden Lithologien. Ihnen wird daher gute Verkarstungsfähigkeit zugeschrieben. Diese Klassifizierung des Steinalm- und Wettersteinkalks unterscheidet sich deutlich von Fink (1969), der diesem schwache Verkarstungsfähigkeit attestierte.

Fink (1969) beschrieb neben Dachsteinkalk auch Gutensteiner Kalk und Dolomit, Reifling-Formation und Opponitz-Formation als ausgezeichnete Träger von Karsterscheinungen. Die statistische Auswertung der normierten Häufigkeit der Dolinen in Bezug zur Lithologie widerlegt jedoch diese Einschätzung. Allerdings wurden einige Höhlen in diesen Lithologien kartiert. Der Gutensteiner Kalk wurde von Wessely (2006) als dünnbankig und dunkel beschrieben, wobei häufig dünne Lagen toniger Schiefer zwischen den Bänken auftreten. In diesen Lagen bilden sich Klüfte, welche durch Frostverwitterung ausgedehnt werden. Dieser Prozess ist im Bereich steiler Hänge ungünstig für die Bildung von Karstformen, begünstigt jedoch auf flachen Gebieten wie Plateaus die Bildung großer Karstformen. Dies könnte ein Grund dafür sein, weshalb der prozentuale Anteil der Dolinen mit Durchmessern ≥ 25 m im Gutensteiner Kalk und Dolomit deutlich höher als jener der Dolinen mit Durchmessern < 25 m liegt.

Fink (1969) beschrieb außerdem verschiedene Jurakalke und Plattenkalk als schwach verkarstungsfähig. Im Zuge dieser Arbeit werden jedoch eine bedeutende Zahl an Karstformen in diesen Lithologien festgestellt, weshalb diese als gut verkarstungsfähig klassifiziert werden. In den Gesteinen der Hallstätter Fazies des alpinen Raum NÖs wurden sehr wenige Karstformen kartiert. Deshalb wird dieser Lithologie schlechte Verkarstungsfähigkeit attestiert, jedoch beschreiben Heinz-Arvand et al. (1997) im steirischen Anteil des Schneearlpenmassivs die Gesteine der Hallstätter Fazies als gut verkarstungsfähig.

Die geringe Verbreitung der Oberseebrekzie, die nur sehr lokal am hochalpinen Dürrenstein-Plateau kartiert ist, wo zudem viel Niederschlag fällt, führt zu der hohen normierten Häufigkeit der Dolinen in dieser Lithologie und wird als statistischer Ausreißer betrachtet.

Die Klassifizierung unterschiedlicher Oberflächenkarstformen wird in der Wissenschaft divers diskutiert und hat sich auch in Österreich verändert. Deshalb werden manche früher verwendeten Begriffe in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, welche in den übernommenen Karstverbreitungs-, Karstgefährdungskarten und anderen Publikationen teilweise angewandt wurden. Ein Beispiel einer divers diskutierten speziellen Karstform stellt das Grünloch dar, welches von Fink (1973) aufgrund der Erstreckung (1,5 km in NE-SW Richtung und 1 km in NW-SE) und der bis auf zwei Ausnahmen steil geböschten Hänge als Karstmulde beschrieben wurde. Auch die Hohlform am Eisenstein wurde als solche beschrieben. Sowohl das Grünloch, in dieser Arbeit als Doline, als auch die fälschlicherweise für eine Karstform gehaltene Hohlform werden in dieser Arbeit anders klassifiziert.

Die räumliche Verteilung der Karstformen im alpinen Raum NÖs wird anhand statistischer Auswertungen an Dolinen betrachtet, wobei hierzu insbesondere die räumliche Verteilung der Dolinen, der Dolinenvolumina sowie die Verteilung in Bezug zur Seehöhe beleuchtet werden. Markant hohe Dolinendichten sind Indikatoren für vermehrte Oberflächenverkarstung, weshalb die in diesen Gebieten kartierten Lithologien als gut verkarstungsfähig klassifiziert werden. Die Stellen erhöhter Dolinendichte sind hauptsächlich an die von Dachsteinkalk, sowie Steinalm- und Wettersteinkalk aufgebauten Plateaus gebunden, was die attestierte gute Verkarstungsfähigkeit dieser beiden Lithologien noch einmal untermauert. Außerdem stellten bereits Spötl und Plan (2016) fest, dass fast alle langen und tiefen Höhlen in den großen Massiven der NKA Österreichs im Dachsteinkalk ausgebildet sind.

In anderen Arbeiten wurden Dolinendichten von 91 bis 146 Dolinen pro km^2 für den Wildoner Buchkogel (Bauer 2015), bis zu 500 im Dinarischen Karst Sloweniens (Mihevc und Mihevc 2021), 122 für das Hochschwab Plateau (Plan und Decker 2006) sowie 6,1 für das Lower Suwannee River Basin (Denizman 2003) ermittelt. Wobei zu erwähnen ist, dass Plan und Decker (2006) einen kleineren Suchradius von 399 m anwandten, der einem Kreis mit der Fläche von 0,5 km^2 entspricht.

Die mittlere Dichte dieser Arbeit beträgt 3,9 Dolinen pro km^2 und ist daher mit den Werten vom Lower Suwannee River Basin vergleichbar. Die anderen genannten Arbeiten betrachten teils kleinere Flächen, beziehungsweise stark verkarstete Plateaus, weshalb die allgemeine Dolinendichte deutlich höher liegt. Der ermittelte Wert für das dicht an Dolinen übersäte Dürrenstein-Plateau liegt mit 120 Dolinen pro km^2 in einem vergleichbaren Bereich zu Bauer (2015) sowie Plan und Decker (2006). Die Oberflächenverkarstung in Slowenien (Mihevc und Mihevc 2021) ist ausgeprägter und weicht deutlich davon ab.

Die Auswertung der Volumendichte unterstreicht die erhöhte Löslichkeit des Dachsteinkalks im Vergleich zu Steinalm- und Wettersteinkalk. Da davon ausgegangen wird, dass beide Kalke eine ähnliche Reinheit haben, wird vermutet, dass die bessere Löslichkeit des Dachsteinkalks auf andere Faktoren zurückzuführen ist. So spielen etwa Tektonik (geringere Sprödigkeit des Gesteins, beziehungsweise Anfälligkeit für Frostverwitterung), Niederschlag und glaziale Geschichte eine große Rolle bei der Verkarstung. Unterstrichen wird der Einfluss diverser Faktoren durch die geringe Anzahl kartierter Oberflächenkarstformen in Gebieten des Wiener Waldes, in denen zwar wie am Dürrenstein-Plateau Dachsteinkalk aufgeschlossen ist, das Ausmaß der Oberflächenverkarstung jedoch deutlich abweicht. Die erhöhten Lösungsvolumina in den Gipsen untermauern deren erhöhte Löslichkeit im Vergleich zu den Karbonaten.

Die Verteilung der Dolinen in Bezug zur Seehöhe hat gezeigt, dass diese miteinander korrelieren. Diese Beobachtung könnte auf die Korrelation steigender Seehöhe mit zunehmendem Niederschlag zurückzuführen sein, welche wiederum vermehrte Korrosion begünstigt. Die geringere Anzahl an Dolinen ab etwa 1600 m wird auf die Überprägung präglazialer Karstformen im Zuge der pleistozänen Kaltzeiten zurückgeführt.

Die Morphologie der Karstformen wird anhand der statistischen Auswertungen an Dolinen erörtert. Zur Berechnung der Volumina wurde, analog zu Bauer (2015) und Plan & Decker (2006), die Kegelformel verwendet. Sowohl die Auswertungen der Volumina, Tiefen als auch der Flächen zeigen, dass der überwiegende Anteil der Dolinen kleinmaßstäblich ist. Primär wird eine Vielzahl an Klüften und Flächen karstmorphologischen Prozessen ausgesetzt, wobei die positive Rückkopplung einiger schneller wachsenden Initialfugen dazu führt, dass diese mehr Niederschlagswasser aufnehmen, wodurch sie sich

schneller als umliegende Fugen und Flächen erweitern, beziehungsweise Gestein abtragen. Zudem führte die Überprägung präglazialer Karstformen in den vergletscherten Gebieten der pleistozänen Kaltzeiten zu vermehrt kleinmaßstäblichen Dolinen. Dieses Phänomen ist beispielsweise am Dürrenstein-Plateau gut festgehalten, wo viele eher schachträtige Dolinen aus überformten, gekappten Schachthöhlen entstanden.

Die Durchschnittsdoline im Untersuchungsgebiet hat ein Volumen von $17,4 \text{ m}^3$, einen Durchmesser von 4,15 m und eine Tiefe von 1,28 m. Verglichen dazu weicht die von Mihevc und Mihevc (2021) für Slowenien beschriebene Durchschnittsdoline (Volumen von 14.098 m^3 , Durchmesser von 42 m sowie Tiefe von 9 m) sehr deutlich ab.

Eine weitere Erklärung der Dominanz kleinmaßstäblicher Dolinen liefert die Überprägung vieler Hochflächen durch glaziale Erosion im Zuge der pleistozänen Kaltzeiten, wonach ältere Karstformen erodiert wurden. Dies betrifft jedoch nur jene Dolinen, welche in den vergletscherten Gebieten der pleistozänen Kaltzeiten kartiert sind.

Der Pitting Index liefert eine einfache Möglichkeit zur Ermittlung des Grades der Verkarstung auf und nahe der Oberfläche. Der in dieser Arbeit ermittelte Pitting Index von 579 für das gesamte Untersuchungsgebiet weicht von den Ergebnissen anderer Arbeiten ab. Denizman (2003) ermittelte für das Lower Suwannee River Basin einen mittleren Pitting Index von 14,5, Bauer (2015) einen von 2,3. Wobei die Größe des Untersuchungsgebietes in letzterer Arbeit kleiner gewählt wurde. Der Grad der Verkarstung auf und nahe der Oberfläche des Dürrenstein-Plateaus ($R_p = 14,0$) ist laut Pitting Index mit dem des Lower Suwannee River Basins vergleichbar. Mit 7,1 % liegt der Anteil der Dolinenflächen an der Plateaufläche deutlich unter dem von Mihevc und Mihevc (2021) im Dinarischen Karst ermittelten prozentualen Flächenanteil an Dolinen (60 %).

Die normierte Häufigkeit der Ponore des Untersuchungsgebietes zeigt, dass sich diese Karstform kaum in Dolomiten ausbildet, da diese schlechtere Verkarstungseigenschaften als reine Kalke, beispielsweise Dachsteinkalk oder Plassenkalk aufweisen.

Die Anzahl der dokumentierten subkutanen Karrenvorkommen übersteigt jene der freiliegenden Formen klar. Etwa drei Viertel der gesamten Karren entstanden in den diversen Kalken, ein sehr geringer Anteil in den Dolomiten.

Abschließend ist festzuhalten, dass es kein allgemein gültiges objektives Maß der Verkarstung gibt, da dieses von etlichen Faktoren abhängig ist. Die statistischen Auswertungen an Dolinen stellen jedoch eine repräsentativ qualitativer Aussage hinsichtlich der Neigung diverser Lithologien zur Ausbildung von Karstformen als jene an Karrenvorkommen und Ponoren dar. Die Ausbildung diverser Karstformen ist stark abhängig von dem ihnen zugrunde liegenden Gestein, wobei der Dachsteinkalk die ausgeprägteste Verkarstung zeigt. Außerdem stellen Steinalm- und Wettersteinkalk sowie Haselgebirge und Werfen-Formation gut, beziehungsweise extrem verkarstungsfähige Lithologien dar. Alle weiteren Lithologien, vor allem die Dolomite, sind hinsichtlich der Morphologie und räumlicher Verteilung der Karstformen NÖs von geringerer Bedeutung.

7. Literaturverzeichnis

- Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Geologischer Dienst (2013): Angewandt-geologische digitale Arbeitskarte Niederösterreich im Maßstab 1:50.000. – Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Bauer, C. (2015): Analysis of dolines using multiple methods applied to airborne laser scanning data. – *Geomorphology*, Bd. 250, 78-88.
- Bauer, F. K. & Schnabel, W. (1997): Geologische Karte der Republik Österreich. Blatt 72 - Mariazell. – Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Bini, A.; Meneghel, M. & Sauro, U. (1998): Karst Geomorphology of the Altopiani Ampezzani. – *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. Bd. 109, 1-21.
- Bögli, A. (1960): Kalklösung und Karrenbildung. – *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. Bd. 2, 4-21.
- Bögli, A. (1978): Karsthydrographie und Physische Speläologie. – Heidelberg: Springer.
- Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (o.J.): Österreichische Karte 1:50 000. UTM 33N. Wien: Bundesministerium für Landesverteidigung.
- Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie (1998): Kartierung der nassen Deposition in Österreich. BE-104. Wien.
- Ćalić, J. (2011): Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term. – *Geomorphology*, Bd. 134, 32-42.
- Cvijic, J. (1893): Das Karstphänomen. Versuch einer morphologischen Monographie. – Wien: E. Hölzel (Geographische Abhandlungen, V, Heft 3).
- Decker, K. (2020): unpublizierte Vorlesungsunterlagen. – Wien: Universität Wien.
- Denizman, C. (2003): Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions. Lower Suwannee river basin, Florida. – *Journal of Cave and Karst Studies*, Bd. 65, 29-35.
- Fink, M. H. (1965): Der erste erfolgreiche Färbeversuch am Schlagerbodenpolje (Frankenfels - St.Anton an der Jeßnitz). – *Die Höhle*, Bd. 16, 67-73.
- Fink, M. H. (1969): Beiträge zur Geomorphologie der Voralpen zwischen Erlauf und Traisen. – *Geographischer Jahresbericht aus Österreich*. Wien: Universität, Institut für Geographie und Regionalforschung (Hg.), Bd. 32, 130-159.
- Fink, M. H. (1973): Der Dürrenstein - Ein Karstgebiet in den niederösterreichischen Alpen. – *Die Höhle*, Beiheft 22.
- Fink, M. H. (1999): Karstverbreitungs- und Karstgefährdungskarsten Österreichs. Blatt 73 - Türnitz. – Wien: Verband Österreichischer Höhlenforscher.
- Fink, M. H. (2007): Karstverbreitungs- und Karstgefährdungskarten Österreichs. Blatt 72 - Mariazell. – Wien: Verband Österreichischer Höhlenforscher.

- Fink, M. H. (2011): Karstverbreitungs- und Karstgefährdungskarten Österreichs. Blatt 4329 - Wilhelmsburg. – Wien: Verband Österreichischer Höhlenforscher.
- Fink, M. H.; Pavuza, R. & Stummer, G. (2005): Daten zur Karstverbreitung und Karstgefährdung in den östlichen Kalkhochalpen: KGK Rax - Schneeberg. – Speldok 16, Wien: Verband Österreichischer Höhlenforscher.
- Ford, D. C. & Williams, P. (1989): Karst geomorphology and hydrology. – Cambridge: Chapman & Hall.
- Ford, D. C. & Williams, P. (2007): Karst Hydrogeology and Geomorphology. – West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Harmand, D.; Adamson, K.; Rixhon, G.; Jaillet, St.; Losson, B.; Devos, A.; Hez, G.; Calvet, M. & Audra, P. (2017): Relationships between fluvial evolution and karstification related to climatic, tectonic and eustatic forcing in temperate regions. – Quaternary Science Reviews, Bd. 166, 38-56.
- Hartmann, H. & Hartmann, W. (1979-2000): Die Höhlen Niederösterreichs. (Bd. 1-5). – Die Höhle, Beihefte 28, 29, 30, 37, 54.
- Heinz-Arvand, M.; Bryda, G. & Rank, D. (1997): Abflussdynamik im Schneealpenmassiv - Zur Abschätzung der Umwelteinflüsse auf die Qualität der Quellwässer. – Report R-143, Wien: Umweltbundesamt.
- Krainer, K. (2016): Regionale Geologie. – Innsbruck: Universität Innsbruck.
- Kranjc, A. (2001): Classical Karst - Contact Karst. a Symposium. – Acta Carsologica, Bd. 30/2, 13-164.
- Lohmann, K.C. (1988): Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst. In: James, N. P. & Choquette, P. W. (Hg.): Paleokarst. – New York: Springer NY, 58–80.
- Meneghel, M. & Sauro, U. (2006): Dolines of karstic and periglacial origin in the high mountain karst of Pale die San Martino plateau (Dolomites). – Zeitschrift für Geomorphologie, Bd. 50/1, 63-76.
- Mihevc, A. & Mihevc, R. (2021): Morphological characteristics and distribution of dolines in Slovenia, a study of a lidar-based doline map of Slovenia. – Acta Carsologica, Bd. 50/1, 11-36.
- Nagl, H. (1970): Karstmorphologische und -hydrologische Beobachtungen in den Göstlinger Alpen. – Die Höhle, Bd. 21, 9-32.
- Oberender, P. & Plan, L. (2018): A genetic classification of caves and its application in eastern Austria. – Geological Society, London, Special publications, Bd. 466, 121-136.
- Palmer, A. N. (2007): Cave geology. – Dayton: Cave Books.
- Pavuza, R. & Oberender, P. (2013): Karst denudation data from the Northern Calcareous Alps (Austria). – Geomorfologický sborník, Bd. 11, 61-62.

- Pavuza, R. & Plan, L. (2011): Karsthydrogeologie und Speläologie in Niederösterreich (Berichte Geologische Bundesanstalt). In: NÖ Geotage (88).
- Pavuza, R.; Prohaska, W. & Traindl, H. (1984): Karstverbreitungs- und Karstgefährdungskarten Österreichs 1: 50 000. Blatt 76 - Wiener Neustadt. – Wien: Verband Österreichischer Höhlenforscher.
- Pavuza, R. & Traindl, H. (1984): Karstverbreitungs- und Karstgefährdungskarten Österreichs. Blatt 70 - Waidhofen/Ybbs. – Wien: Verband Österreichischer Höhlenforscher.
- Pfeffer, K.-H. (2010): Karst. Entstehung - Phänomene - Nutzung. – Stuttgart: Borntraeger.
- Plan, L. (2003): Das Aschenmoos - Bearbeitung eines Kontaktkarstgebietes am Königsberg (Teilgebiet 1822), NÖ. – Die Höhle, Bd. 54/2, 25-35.
- Plan, L. (2005a): Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian alps. – Geomorphology, Bd. 68, 201-212.
- Plan, L. (2005b): Speläologisch-karstkundliche Untersuchungen im Rahmen des Projektes. Hydrogeologische Grundlagen Ybbs-West., Höhlenkundliches Mitt. Wien.
- Plan, L. (2016): Oberflächenkarstformen. In: Spötl, C.; Plan, L. & Christian, E. (Hg.): Höhlen und Karst in Österreich. – Linz: Oberösterreichisches Landesmuseum, 23-34.
- Plan, L. & Decker, K. (2006): Quantitative karst morphology of the Hochschwab plateau, Eastern Alps, Austria. – Zeitschrift für Geomorphologie, Bd. 147, 29-54.
- Plan, L.; Decker, K.; Meissl, M.; Wieselthaler, F. & Wagreich, M. (2007): KATER II: Karstological Research in the Catchment Area of the Vienna Spring Water Main. – Wien: Wiener Wasserwerke – MA31.
- Plan, L.; Funk, B.; Hardege, J.; Oberender, P.; Sulzbacher, D. & Winkler, I. (2019): NÖ-Karst: Endbericht. Digitale karstmorphologische Karte Niederösterreichs. – Unpublizierter Endbericht des Naturhistorisches Museums Wien an das Land NÖ.
- Plan, L.; Hartmann, H. & Hartmann, W. (2016): Kalkalpen-Ostabschnitt. In: Spötl, C.; Plan, L. & Christian, E. (Hg.): Höhlen und Karst in Österreich. – Linz: Oberösterreichisches Landesmuseum, 661-682.
- Ruttner, A. & Schnabel, W. (1988): Geologische Karte der Republik Österreich. Blatt 71 - Ybbsitz. – Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Sauro, U. (2013): Landforms of mountainous karst in the middle latitudes. Reflections, trends and research problems. – Acta Carsologica, Bd. 42/1, 5-16.
- Schmalfuß, C. (2020): Die Karstquellen Niederösterreichs - Eine Synthese. – unpubl. Masterarbeit. Wien: Universität Wien.
- Schnabel, W. (1998): Geologische Karte der Republik Österreich. Blatt 58 - Baden. – Wien: Geologische Bundesanstalt.

- Schnabel, W.; Krenmayr, H. G.; Mandl, G. W.; Nowotny, A.; Roetzel, R. & Scharbert, S. (2002): Geologische Karte von Niederösterreich 1:200.000. Legende und kurze Erläuterung. – Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Schober, A. (2014): Speläogenese der Hermannshöhle (Kirchberg/Wechsel, NÖ). – unpubl. Masterarbeit. Wien: Universität Wien.
- Schubert, G. (2006): Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte von Österreich. – Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Seidl, S. (2012): Quartärgeologie des Raums Schneebergdörfel Puchberg am Schneeberg. – unpubl. Masterarbeit. Wien: Universität Wien.
- Spötl, C. & Plan, L. (2016): Karst und Höhlen. In: Spötl, C.; Plan, L. & Christian, E. (Hg.): Höhlen und Karst in Österreich. – Linz: Oberösterreichisches Landesmuseum, 1–10.
- Spötl, C.; Plan, L. & Christian, E. (Hg.) (2016): Höhlen und Karst in Österreich. – Linz: Oberösterreichisches Landesmuseum.
- Veress, M. (2010): Karst Environments. Karren Formation in High Mountains. – Dordrecht: Springer Netherlands.
- Veress, M. (2019): The KARREN and KARREN formation of bare slopes. – Earth-Science Reviews, Bd. 188, 272–290.
- Völk, G. (1987): Markierungsversuch Ursula Quelle. Report UBA-87-019, – Wien: Umweltbundesamt.
- Wessely, G. (2006): Geologie der österreichischen Bundesländer Niederösterreich. – Wien: Geologische Bundesanstalt.
- White, W. B. (2000): Dissolution of limestone from field observations. In: Klimchouk, A.; Ford, D. C.; Palmer, A. N. & Dreybrodt, W. (Hg.): Speleogenesis - Evolution of karst aquifers. Huntsville, 149–155.
- Winkler, I. (2019): Gipskarst in Niederösterreich. Verbreitung und Formen. – unpubl. Masterarbeit. Wien: Universität Wien.

ANHANG

Tabelle 14: Einteilung sämtlicher stratigraphischer jurassischer Einheiten zu den Gesteinen der verkarstungsfähigen und nicht-verkarstungsfähigen Jura i.A.

zugeordnete Lithologie	Ursprünglich kartierte Quelle_Legende
verkarstungsfähige Jura i.A.	Adnet-(Enzesfeld-)Formation (roter Kalk; Lias)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Adneter/Klausenkalk (rötlicher und bräunlichgrauer Kalk; Lias - Dogger)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenschichten
verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenschichten (geschichteter, z.T. mergeliger Kalk, z.T. mit Hornsteinen) und heller Kalk (Tithon - Neokom)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Jurakalke
verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Jurakalke (Dogger - Malm)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Kalke (Enzesfelder Kalk, Adneter Kalk; Lias)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Kalke (Lias - Dogger)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Kalke, Radiolarit (Jura)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Mittel-Oberjura Kalke i. allg.
verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Oberalmer Schichten (violetter, Hornstein führender Kalk, Blockbreccie; Malm)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunter Kalk (Lias)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunter Kalk (Lias-Dogger)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Crinoidenkalk, Hornsteinkalk (Lias)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Crinoidenspatkalk (Lias-Dogger)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Enzesfelder Kalk; Hierlatzkalk (Lias)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Heller Kalk (Tithon-Neokom) und Aptychenschichten (geschichteter, z.T. mergeliger Kalk, z.T. mit Hornsteinen)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Hierlatzkalk
verkarstungsfähige Jura i.A.	Hierlatzkalk (Lias)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Hierlatzkalk; Crinoiden-Hornsteinkalk
verkarstungsfähige Jura i.A.	Hornsteinkalke und Radiolarite
verkarstungsfähige Jura i.A.	Lias - Dogger im Allgemeinen
verkarstungsfähige Jura i.A.	Oberalmer Schichten (grauer, z.T. mergeliger, geschichteter Kalk, z.T. mit Hornsteinen; Malm), einschl. Barmsteinkalk (Kalkarenit) und Aptychenkalk
verkarstungsfähige Jura i.A.	Oberalmer Schichten (Kimmeridgium - Tithonium/Berriasium)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Oberalm-Formation (heller, gebankter Kalk bis Mergelkalk), Barmsteinkalk (Malm)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Radiolarit (Malm)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Riesenschollen oder Gleitbretter kalkalpiner Gesteine
verkarstungsfähige Jura i.A.	Riffschuttkalk (Malm-?Unterkreide)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Rote Kalke des Jura
verkarstungsfähige Jura i.A.	Roter Flaserkalk
verkarstungsfähige Jura i.A.	Roter Flaserkalk (Dogger)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Schieferton, kieselig-mergelig (Dogger)
verkarstungsfähige Jura i.A.	Vilserkalk

nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Allgäu-Formation (Fleckenmergel; Lias)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Allgäu-Formation (Fleckenmergelkalk)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Allgäu-Formation i. allg., meist in "Lias-Fleckenmergel"-Fazies (Unter-Jura)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Allgäuschichten
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Allgäuschichten ("Lias - Fleckenmergel")
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Allgäuschichten (Fleckenkalk, Fleckenmergel, sandiger bituminöser Kalk, Kieselkalk; Lias-Dogger)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Allgäuschichten (Lias - Fleckenmergel)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Ammergau-Formation ("Aptychenkalk". Schichtiger, dichter Kalkmergelstein, Mergellagen, z.T. Hornstein; Tithon - Unterste Kreide)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychen Schichten
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk - Schrambach-Formation (hellgrau-rötlicher Kalkmergel und Mergelkalk; Tithonium - Untere Kreide)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk (E Kaiserberg)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk (heller Kalkmergel; Tithon - Neokom)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk (Kalkmergel; Tithon - Unterneokom)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk (Oberer Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk (Tithon-Neokom)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk und -mergel (geschichtet, z.T. mit Hornstein; Tithon - Unterkreide)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk, Fleckenmergel (Malm - Neokom)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk, Fleckenmergel (Malm - Neokom) (071.737) mit Brekzienkalk (Konradsheimer Schichten, Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk, Fleckenmergel (Tithon - Neokom)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk, Fleckenmergel (Tithon-tiefere Unterkreide)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk, Fleckenmergel (Tithon-Unterkreide)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk, Fleckenmergel (vorw. Tithon)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenkalk, inkl. Bunter Tithonkalk (Mayerling, Gutental, Zobelhof; Tithon-Neokom)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenschichten
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenschichten (geschichteter, z.T. mergeliger Kalk, z.T. mit Hornstein; Tithon - Neokom)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenschichten (geschichteter, z.T. mergeliger Kalk, z.T. mit Hornsteinen) und heller Kalk (Tithon - Neokom)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Aptychenschichten, Fleckenmergel (geschichteter, z.T. mergeliger Kalk, z.T. mit Hornsteinen; Tithon - Neokom)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Jurakalke (Dogger - Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Kalke, Kalkmergel, Kieselkalk (Arzbergkalk u.ä., höhere Dogger - Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Kalke, Radiolarit (Jura)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunte Mittel-Oberjura Kalke i. allg.
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Bunter Kalk (Dogger-Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Calpionellenkalk (Tithon), Agatha-Formation (Saccocomakalk; Kimmeridge)

nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Dogger im Allgemeinen
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Fleckenkalk, Fleckenmergel (Lias-Dogger)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Fleckenmergel
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Grauer Mergelkalk, grauer, kieselig-sandiger Mergel oder Fleckenmergel (Allgäuschichten; Lias)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Hellbrauner, spätinger Kalk (?Kimmeridge-Tithon)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Hornsteinkalk (Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Hornsteinkalk, Hornsteinkalkarenit (?Kimmeridge)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Hornsteinkalke und Radiolarite
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Kalksburg-Formation (kalkiger Sandstein, Mergellagen)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Kiesel- und Radiolaritschichten (Ruhpoldinger Schichten; Oxford)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Kieselkalk
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Kieselkalk (?Lias)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Kieselkalk (Lias)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Kieselkalk, Radiolarit (Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Kieselschiefer und Gresten-Formation (sandiger Kalk, Mergelkalk; Jura)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Klauskalk (Dogger)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Klauskalk (Filamentkalk; Dogger)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Klauskalk (Filamentkalk; Dogger. In der Flösselmulde inkl. Mikro-Oolithkalk)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Klauskalk (roter Cephalopodenkalk); Dogger
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Klauskalk u. Hornsteinkalk
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Klauskalk, Flaserkalk, Radiolarit (Dogger-Oxford)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Klauskalk, Hornsteinkalk (Dogger)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Klausschichten (roter Knollenkalk, Filamentkalk, Protoglobigerinenkalk; Mitteljura)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Lias-Kieselkalk, Kirchsteinkalk (dunkler geschichteter Kalk, Hornsteine)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Mikro-Oolithkalk (Globigerinenoolith; Dogger-?Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Radiolarit (?Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Radiolarit (Jura)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Radiolarit (Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Radiolarit, kieseliger Kalk (Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Roter Kalkmergel (Weissenburggegend)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Ruhpoldinger Radiolarit
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Ruhpoldinger Radiolarit (Oxfordium - Kimmeridgium)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Ruhpoldinger Schichten (Kieselkalk, Radiolarit); Malm
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Ruhpolding-Formation (Radiolarit; Malm)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Spiculaekalk, inkl. Scheibelberg-Formation, hornsteinführend (Lias)
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Suturenkalk
nicht-verkarstungsfähige Jura i.A.	Tektonischer Mischbereich von Schrambach-Formation, Aptychenkalk und Allgäu-Formation vor der Stirn der Lunzer Decke