Angkorvat_02
Baugeol. Büro Bauer GmbH, Domagkstraße 1 a, 80807 München

An die
Gemeinde Pullach im Isartal
Herrn Kotzur
Johann-Bader-Straße 21

82049 Pullach im Isartal

Baugeologisches Büro Bauer GmbH
Domagkstraße 1 a
D-80807 München

www.baugeologie.de

Bearbeiter: Markus Bauer
Dr. Peter Neumann
Daniel Davies

Telefon: +49-89-36040-465
Fax: +49-89-36040-5465
e-mail: Peter.Neumann@baugeologie.de

Gefahren-Atlas Hangbewegungen der Gemeinde Pullach im Isartal

Ingenieurgeologische Bestandsaufnahme und Georisiko-Analyse am westlichen Isarufer zwischen Burg Schwaneck und Grünwalder Brücke

Erläuterungsbericht

ZWISCHENBERICHT - Februar 2016

Projektnummer:	02863
Auftraggeber:	Gemeinde Pullach im Isartal Johann-Bader-Straße 21 82049 Pullach im Isartal
Datum:	15. Februar 2016

Inhaltsverzeichnis **Seite**

1 Ziele ... 11

1.1 Veranlassung ... 11
1.2 Arbeitsgebiet ... 12
1.3 Aufgabenstellung und Ziele ... 12
1.4 Verwendete Unterlagen ... 13

2 Methodik und Untersuchungen ... 18

2.1 Geologische Kartierung ... 18
2.2 Historische Recherche ... 19
2.3 Erhebung von Aufschlüssen und Labordaten ... 19
2.4 Installation von Deformationsmessungen ... 20
2.5 Untersuchung im Projektgebiet mittels Electrical Resistivity Tomography ... 21
2.6 Bodenkennwerte – Literaturstudie und ergänzende Analytik ... 23
2.7 Generalisierende Standsicherheitsanalysen ... 24
2.8 GIS-Einbindung ... 26

3 Geologischer Rahmen ... 27

3.1 Historische Geologie im Süden Münchens ... 27
3.2 Neogener Flinz ... 30
3.3 Pleistozäne Schotterterrassen ... 31
3.4 Holozäne Entwicklung des Pullacher Isartales ... 32

4 Abriss der Bearbeitungsgeschichte ... 34

4.1 Burg Schwaneck - Burgweg - Heilmannstraße ... 34
4.2 Bürgerhaus Pullach ... 38
4.3 Kirchplatz ... 40
4.4 Habenschadenstraße - Treppenweg - Kalkofenweg ... 41
4.5 Brückenweg ... 44
4.6 Grünwalder Brücke ... 44
4.7 Wissenschaftliche Arbeiten ... 46

5 Ingenieurgeologische Bestandsaufnahme ... 47

5.1 Geologischer Abriss des Bearbeitungsgebietes ... 47
5.2 Geologisch-geotechnische Stratigraphie ... 49
5.2.1 Flinz (Obere Süßwassermolasse) ... 49
5.2.2 Pleistozäne Terrassen ... 50
5.2.3 Holozäne Bildungen ... 51
5.2.4 Geologische Einheiten der Kartenblätter 1:1000 ... 52

5.3 Bedeutung von Zementation und Verwitterung ... 53
5.4 Hydrogeologie ... 55
5.4.1 Grundwassersituation ... 55
5.4.2 Brunnen, Pegel, Quellen ... 57
5.5 Historischer Abriss dokumentierter Hangbewegungen ... 57
5.6 Anthropogener Einfluss ... 61
5.6.1 Bebauung und Nutzung am Isarhochufer ... 61
5.6.2 Isarwerkkanal und Sylvensteinspeicher ... 63
5.6.3 Grünwalder Isarbrücke ... 64
5.7 Bodenkennwerte - Parameterstudie ... 64
5.8 Kritische Hanghöhe nach Baumann ... 66
5.9 Hangbewegungsmonitoring ... 68

6 Ingenieurgeologische Gefährdungsanalyse ... 72

6.1 Klassifizierung der Hangbewegungen am Pullacher Isarhang ... 72
6.1.1 Lockergesteinsrutschung / Hanganbruch ... 74
6.1.2 Großrutschungen ... 75
6.1.3 Steinschlag ... 79
6.1.4 Blockstürze ... 79
6.1.5 Felssturz ... 81
6.2 Analyse der Aktivität der Hangbewegungen ... 82
6.2.1 Frequentistische Analyse ... 83
6.2.2 Regionale Differenzierung der Aktivität ... 86
6.3 Deformationsmessungen ... 88
6.3.1 Ergebnisse des Monitoring in Borlochmessstellen ... 88
6.3.2 Ergebnisse der Kongvergenzmessungen ... 90
6.3.3 Ergebnisse der Kluftspione ... 95
6.4 Ergebnisse der Electrical Resistivity Tomography ... 96
6.5 Geotechnische Modellierungen ... 96
6.5.1 Baugrundmodelle und repräsentative Querschnitte ... 97
6.5.2 Exemplarische Standsicherheitsanalysen ... 98
6.6 Erstellung des Gefahren-Atlas Hangbewegung ... 101
6.6.1 Funktionsweise ... 101
6.6.2 Spezifikationen und Begriffe ... 102
6.6.3 Gefährdungsgrade – Zwischenergebnisse und Ausblick ... 106
6.6.4 Signaturen und Kartendarstellung ... 108

7 Anwendung des Gefahren-Atlas Hangbewegungen ... 110

7.1 Kommentar zum Leistungsumfang ... 110

7.2 Anwendungsmöglichkeiten 110

8 Ausführungen zur GIS-Einbindung.....110

9 Schlussbemerkung 111

Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Thematische Kartensätze und Pläne
Anlage 1.1 Geologische Karte mit Hangbewegungsphänomenen, Teil Nord 1:1.000
Anlage 1.2 Geologische Karte mit Hangbewegungsphänomenen, Teil Süd 1:1.000
Anlage 1.3 Legende zur geologischen Karte 1:1.000
Anlage 1.4 Gefahrenkarte A – Sturzprozesse
Anlage 1.5 Gefahrenkarte B – Erosion von Lockermaterial / Hanganbrüche
Anlage 1.6 Gefahrenkarte C – Großer Felssturz
Anlage 2 Konvergenzmessungen – Auswertung
Anlage 3 Auflistung von Aufschlüssen der Neogen-Oberfläche
Anlage 4 Bodenuntersuchungen
Anlage 5 Fotodokumentation potentieller Felssturzbereiche

Abbildungsverzeichnis Seite

Abb. 1: Überblick des Arbeitsgebietes und seiner weiteren Umgebung mit Eintragung einiger historischer Rutsch- oder Sturzereignisse. Das Arbeitsgebiet befindet sich im oberen Abschnitt, nördlich der Grünwalder Brücke. Besonderes Ausmaß hatten die Großrutschungen im Bereich der Brücke in den siebziger Jahren sowie der große Abbruch am Burgweg 1962. 12
Abb. 2: Gespanntes Extensometer an der KVM 1/8 mit Blickrichtung Werkkanal. 20
Abb. 3: Beispiel von Mauer- und Kluftspionen, links: P3 Habenschadenstraße 17 (seit 2013), rechts: M1, Konglomeratüberhang am Treppenweg (seit 2005). 21
Abb. 4: Profillinie der ERT-Messung zwischen den Ortsteilen Pullach (N) und Höllriegelskreuth (S).22
Abb. 5: Vereinfachter geologischer Überblick der Münchener Schotterebene (grau umrandete Fläche) zwischen der südlichen Moränenlandschaft und dem tertiären Hügelland [U 25]. . 27
Abb. 6: Erdgeschichtliche Tabelle für München und Pullach (nach [U 25]). Die Abkürzungen bezeichnen die Formationen gemäß amtlichen Kartenblatt von München 1:50.000 [U 17]. Das Isarhochufer in Pullach wird i.W. von dem Flinz (mio) aufliegenden jüngeren Deckenschottern (M, G) und rißzeitlicher Hochterrasse (R, G) aufgebaut. 29
Abb. 7: Paläogeographie Münchens und Pullachs in zwei erdgeschichtlichen Phasen ([U 19] [U 25]). 30
Abb. 8: Stratigraphie des Pullacher Untergrundes mit dem tief eingeschnittenen Isartal und der Verflachung im Stadtgebiet von München (nach Dreesbach 1985 und Meyer & Schmidt-Kaler 1997). 32
Abb. 9: Profilschnitt durch den Isartal-Canyon südlich von Grünwald / Pullach (Ausschnitt aus der amtlichen geologischen Karte 1:50.000 [U 17]), 5-fach überhöht. 32
Abb. 10: Foto der Abrisskante der Rutschung am Burgweg 1962. Links der Bungalow von Burgweg 2 (wurde nach dem Ereignis aus Sicherheitsgründen geräumt), rechts ist die Burg Schwaneck zu erkennen. Blickrichtung NE (entnommen aus: Baumann 2010 [U 21]). 35
Abb. 11: Gründungsarbeiten für das 1996 fertiggestellte Bürgerhaus. Rechts sind Werkkanal und Isar zu erkennen. Blickrichtung N (entnommen aus: Baumann 2014 [U 21]). 38
Abb. 12: Rutschung am Kirchplatz 1 von 2013 [U 12]. Die grünen Punkte in der Geologischen Karte (links) stellen die Messfixpunkte der Konvergenzmessstrecken 2-Rabenwirt und 3-Rabenwirt dar. Das Foto zeigt die Rutsch- bzw. Transportfläche, die Abrisskante ist durch die Vegetation am Geländer verdeckt. Blickrichtung Nord. 41
Abb. 13: Überblick über die Erkundung im Widerlagerbereich der Grünwalder Brücke (entnommen aus: Baumann 2014 [U 21]). 45
Abb. 14: Geologisch-geotechnische Profile mit Darstellung der alten Grünwalder Brücke (entnommen aus: Baumann 2014 [U 21]). 45
Abb. 15: Überblick der wissenschaftlichen Bearbeitung durch Studienabschluss-arbeiten am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU München. 46
Abb. 16: Vereinfachte geologisch-morphologische Übersicht des Isarhochufers im Gemeindebereich Pullach. 48
Abb. 17: Flinz-Aufschluss (RW: 4.464.777, HW: 5.324.475) in stark humoser Hangschuttbedeckung, die Quartär-Neogen-Grenze ist nicht aufgeschlossen. Im rechten Bereich bildet sich aufgrund des austretenden, kalkreichen Wassers ein Kalksinter-Überzug auf dem Moos... 50
Abb. 18: Deckenschotter-Aufschluss (links) mit Detailaufnahme (rechts) südlich des ehemaligen Jaiserhauses (RW: 4.464.140, HW: 5.323.419). 51
Abb. 19: Locker gelagerter, kiesig-sandiger Hangschutt unterhalb der Konglomeratwand mit hohem organischen Anteil. 52
Abb. 20: Ausschnitt der Legende zur geologischen Kartierung mit den Haupteinheiten (geotechnische Homogenbereiche). 53

Abb. 21: Überhängende Konglomeratwand ca. 60m nordöstlich des Bürgerhauses mit unterschiedlichem Lithifizierungsgrad. Im vorderen Bereich senkrechte, stark verbackene, im hinteren Teil schwach zementierte Konglomeratwand. Blickrichtung Nordosten..... 55
Abb. 21: Niederschlagsmengen (Tageswerte in mm) für die Gemeinde Pullach im Zeitraum Jan. 2010 bis Sept. 2015, gemittelt aus den Wetterstationen Kloster Schäftlarn (557 müNN) und Oberhaching-Laufzorn (604 müNN) [WESTE-XL Daten des DWD]..... 56
Abb. 23: Grundwasserstände von 10 Pegelbohrungen am Hangfuß unterhalb der Burg Schwaneck zwischen 1964 bis 2001. Zudem sind die monatlichen Niederschlagsmengen dargestellt (Quellen: Pegelstände (Bayerisches Landesamt für Umwelt), Niederschlagsmengen (Deutscher Wetterdienst)). 57
Abb. 24: Isartal bei Pullach und Grünwald mit Blick nach Süden auf Grünwalder Burg vom westlichen Isarhochufer aus. Ölgemälde von H.E. von Zeech 1850 (entnommen aus [U 19]. Die riesigen Nagelfluhblöcke sind bereits entfernt worden. Das Gemälde dokumentiert also ein früheres Großereignis..... 58
Abb. 25: Übersichtskarte aller dokumentierten Massenbewegungen im Projektgebiet seit 1940, die zeitlich und räumlich zugeordnet werden konnten..... 60
Abb. 26: Rutschung/Sturz von aufgewittertem Konglomerat und Lockermaterial unterhalb der Habenschadenstraße 17 im Jahr 1995 (Foto zur Verfügung gestellt von Frau Schütze). 61
Abb. 27: Charakterisierung der Bebauungs- und Nutzungssituation im Bereich des Pullacher Isarhochufers. 62
Abb. 28: Darstellung der kritischen Hanghöhe im Projektgebiet (nach Baumann, 1988). 67
Abb. 29: Zusammenfassung der Monitoring-Einrichtungen am Pullacher Isarhochufer. Geodätische Vermessungsnetze sind nicht dargestellt. 70
Abb. 30: Schematische Darstellung der prinzipiellen Gefährdungsbilder am Pullacher Isarhang. 73
Abb. 31 Schematisches Profil einer Lockergesteinsrutschung mit Rutschungskrone, Abbruchkante und Gleitfläche. 74
Abb. 32: Lockergesteinsrutschung / Hanganbruch unterhalb des Bürgerhauses. Der Pfeil zeigt kompakte Schotter und Konglomerate, die ein Tieferreichen der Rutschungsbasis verhindern. Die Rutschmassen wurden ca. 20 m Richtung Isar transportiert. Blickrichtung Nordost. 75
Abb. 33: Schematisches Profil einer kombinierten Rotations-Translationsrutschung mit den Phasen: Grenzgleichgewicht (1), Ausbildung von Klüften im Konglomerat (2), vertikale Setzungen und Verdrängen der unterlagernden Schichten (3), Übergang in ein planares Gleiten (4), reliktische Rutschscholle mit erodierter talseitiger Melange (5)..... 76
Abb. 34: Abrisskante in Terrassenschottern und Rutschungskopf mit betrunkenem Wald einer noch jungen, nicht näher lokalisierten Rutschung am Hang des Isartals bei Grünwald. Das Bild zeigt die in obiger Abbildung (Bild 3) skizzierte Phase. – Foto: H.J. Baumann [U 27]. 77
Abb. 35: Kleiner Blocksturz (jung) unterhalb Habenschaden-straße 21, der im flachen Bereich des Hanges zum Liegen kam. In der Nagelfluhwand oberhalb ist ein großer, unverwitterter Bereich zu erkennen (roter Kreis). Dabei handelt es sich um die Anbruchfläche. 80
Abb. 36: Potentieller Felssturzblock ca. 80 m südöstlich der Burg Schwaneck. Hangseitig ist die Felsnase bereits teilweise durch eine weit geöffnete Kluft von der Konglomeratwand abgetrennt. Der Fuß der Felsnase hat aufgrund erodierter Rollkieslagen teilweise kein Widerlager mehr (Blickrichtung Osten). 82
Abb. 37: Zeitstrahl der Massenbewegungen im Bereich der Gemeinde Pullach ab 1940. Da sie vermutlich als nicht relevant eingestuft wurden, finden sich in der Literatur keine Lockergesteinsrutschungen / Hanganbrüche vor 2003. 83
Abb. 38: Vergleich der Hangkante heute – 1841 (Quelle: heute (dgm2 des Landesamtes für Vermessung), 1841 (Bayernatlas, historische Karte 1817-1841)..... 85

Abb. 39: Messergebnisse des Stangenextensometers am Hangfuß unterhalb der Burg Schwaneck (SB-4). Rot hervorgehoben sind Beschleunigungen innerhalb der obersten Bodenmeter (Quelle: verändert nach Datenbestand des LfU). 88
Abb. 40: Die Konvergenzmessstrecken Burgweg (KVM 4), vergrößert aus der Geologischen Karte mit absoluten Abstandsmessungen. Rot = Verkürzung, blau = Verlängerung der Messstrecke. 91
Abb. 41: Die Konvergenzmessstrecken am Rabenwirt / Kirchplatz 1 (KVM 2 + 3), vergrößert aus der Geologischen Karte mit absoluten Abstandsmessungen. Rot = Verkürzung, blau = Verlängerung der Messstrecke. 92
Abb. 42: Die Konvergenzmessstrecken Habenschadenstraße 15, vergrößert aus der Geologischen Karte mit absoluten Abstandsmessungen. Rot = Verkürzung, blau = Verlängerung der Messstrecke. 94
Abb. 43: Exemplarisches geologisches Profil des Pullacher Untergrundes. 97
Abb. 44: Berechnung des Sicherheitsbeiwertes (FoS nach Janbu = 1,01; FoS nach Bishop = 1,06) für ein Versagen des Hanges mit einer Bruchmechanik wie bei **Hanganbrüchen**. Dargestellt sind alle Gleitbahnen mit einem FoS < 1,5. Die Berechnung nach Janbu zeigt folglich auch Gleitkreise, die im Bereich der Rotations-Translationsrutschungen mit einem FoS = 1,48 liegen. 100
Abb. 45: Berechnung des Sicherheitsbeiwertes (FoS nach Janbu = 1,38; FoS nach Bishop = 1,45) für ein Versagen des Hanges mit einer Bruchmechanik wie bei **Rotations-Translationsrutschungen**. Die dicke blaue Linie ist eine zuvor definierte mögliche Gleitbahn. Dargestellt sind die 100 Gleitkreise mit dem niedrigsten FoS. 100
Abb. 46: Darstellung der Arbeitsschritte und des Leistungsumfangs des „Gefahren-Atlas Hangbewegungen“: Von der lokalen Erkennung von Naturgefahren, deren regionaler Erfassung bis hin zur Gefahrenkarte. 102
Abb. 47: Prozess der Wahrscheinlichkeitsermittlung für Sturzprozesse (Gefährdungsbilder A und C). 104
Abb. 48: Gefährdungsmatrix der Sturz- und Rutschprozesse gegliedert nach Gefährdungsbildern A, B und C. 109

Tabellenverzeichnis Seite

Tab. 1: Zusammenfassung der in der geologischen Karte verwendeten Abkürzungen für technische Einrichtungen. 19
Tab. 2: Spezifische Widerstände der Gesteine im Untergrund von Pullach [U 57]. 23
Tab. 3: Zusammenstellung durch BBB berechneter geotechnischer Querprofile. 24
Tab. 4: Ergebnisse der Leichten Rammsondierungen im Bereich der Burg Schwaneck an der Hangkante (1972) DPL-5 und am Hangfuß (1989) DPL-10. (Quelle: Datenbestand des LfU). 36
Tab. 5: Beschreibung der in den Jahren 1962/63 abgeteuften Pegelbohrungen (PB) sowie der 1964/89 abgeteuften Horizontal- und Schrägbohrungen (HB/SB) am Hangfuß im Bereich der Burg Schwaneck. (Quelle: Datenbestand des LfU). 37
Tab. 6: Ergebnisse der Schweren Rammsondierung an der Hangkante (Heilmannstraße 8) aus dem Jahr 1996, durchgeführt vom Prüfamt für Grundbau, TU München (Quelle: Datenbestand des LfU). 38
Tab. 7: Ergebnisse der Schweren Rammsondierungen am Bürgerhaus im Hangbereich (DPH 1-7) und am Gebäude (DPH-8) (Quelle: Datenbestand des LfU). 38
Tab. 8: Ergebnisse der Kernbohrungen am Bürgerhaus im Bereich des Gebäudes (NMB 1) und im Hangbereich (GMB 2, TVB 3) (Quelle: Datenbestand des LfU). 39
Tab. 9: Ergebnisse der Kernbohrung BK-1 und der Schweren Rammsondierungen (DPH1-3) hangseitig des Anwesens Habenschadenstraße 13 ([U 49]). 41
Tab. 10: Ergebnisse der Handbohrungen im Oberhang und der KRB am Hangfuß bei Habenschadenstraße 23-27 [U 3]. 42
Tab. 11: Ergebnisse der Rammkernbohrungen an der Habenschadenstraße 33 im Bereich der Hangkante und am Hangfuß (Quelle: Datenbestand des LfU). 43
Tab. 12: Ergebnisse der Handbohrungen im Oberhang am Brückenweg sowie der Schweren Rammsondierungen am Hangfuß [U 6]. 44
Tab. 13: Zusammenfassung der Flinz-Aufschlüsse im Projektgebiet. 49
Tab. 14: Zusammenfassung zu den holozänen Böden und Fels. 52
Tab. 15: Ergebnisse Vorläufiger Katalog dokumentierter historischer Hangbewegungsereignisse seit dem 20. Jahrhundert). 59
Tab. 16: Zusammenstellung der in den Gutachten verwendeten Bodenparameter für die Standsicherheitsanalysen. Die unterschiedlichen Bezeichnung der Schichten in den Gutachten wurde zu einer einheitlichen Nomenklatur zusammengeführt. 65
Tab. 17: Geotechnische instrumentierte Bohrungen am westlichen Isaraufer zwischen Grünwalder Brücke und Burg Schwaneck. 69
Tab. 18: Bestehende geodätische Messprofile. 69
Tab. 19: Konvergenzmessstrecken, installiert durch BBB im Jahr 2014. 71
Tab. 20: Kluft- und Mauerspione, installiert durch BBB in den Jahren 2005 [U 9] und 2013 [U 11]... 71
Tab. 21: Zusammenfassung der markanten Rotations-Translationsrutschkörper im Projektgebiet. Streichen und Fallen der rotierten Schichtstapel entweder gepeilt oder durch Direktmessungen am anstehendem Konglomerat (kursive Werte) bestimmt. 77
Tab. 22: Anzahl der jungen und alten Rutsch- und Sturzereignisse am W‘ Isarufer im Bereich von Pullach, auf Grund-lage der geologischen Kartierung. Ältere Steinschläge wurden aufgrund ihrer Häufigkeit nicht kartiert. Bei den Großrutschungen wurden sekundäre Rutschungen nicht mit aufgenommen. 86
Tab. 23: Absolute Bewegungen der einzelnen Messstrecken der Konvergenzmessstrecke Burgweg (KVM 4) sowie deren ursprüngliche Länge. Negative Werte = Verkürzung, positive Werte = Verlängerung der Messstrecke. 90
Tab. 24: Absolute Bewegungen der einzelnen Messstrecken der Konvergenzmessstrecken am Rabenwirt (KVM 2+3) sowie deren ursprüngliche Länge. Negative Werte = Verkürzung, positive Werte = Verlängerung der Messstrecke. 92

Tab. 25: Absolute Bewegungen der einzelnen Messstrecken der Konvergenzmessstrecke Habenschadenstraße 15 (KVM 1) sowie deren ursprüngliche Länge. Negative Werte = Verkürzung, positive Werte = Verlängerung der Messstrecke. 94
Tab. 26: Ergebnisse der Kluftspion-Messungen an den Terrassen der Habenschadenstraße 15 und 17. 95
Tab. 27: Ergebnisse der Kluftspion-Messungen an den Nagelfluhwänden am Treppenweg. 95
Tab. 28: Bodenparameter für die Standsicherheitsanalysen am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TUM 98
Tab. 29: Begriffsdefinition und Volumenangaben zu Sturzmassen. 102
Tab. 30: Verdachtsflächen für Anbrüche größerer Stürze (Blockschlag bis Felssturz). 107

VORBEMERKUNG:

Der vorliegende Zwischenbericht fasst die ingenieurgeologische Bestandsaufnahme und die Untersuchungen zur Hangbewegungssituation des Pullacher Isarhanges im Zeitraum Herbst 2013 bis in das Jahr 2015 zusammen. Die Arbeiten gemäß den Positionen unseres Angebots A13-039 vom 30. Juli 2013 sind zum Großteil abgeschlossen und Gefährdungsanalysen für die potentiellen Hauptversagensprozesse Sturz (Steinschlag bis Felssturz) und Rutschprozesse / Hanganbrüche wurden erstellt. Die Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Ingenieurgeologie TU München ausgeführt (Masterarbeit D. Davies).

Im Zuge einer späten Erkundungsphase wurden geoelektrische Messungen entlang eines Hangprofils am Joseph-Breher-Weg durchgeführt. Die Ergebnisse werfen geologische Fragen auf, die nicht ohne zusätzliche Untersuchungen verlässlich beantwortet werden können, aber u.U. Auswirkungen auf die Interpretation der Stabilität der Hänge bzw. in Bezug auf die Wahrscheinlichkeit und Erkennbarkeit von Großrutschungen oder großen Felssturzereignissen haben können.

In einer Besprechung bei der Gemeinde Pullach im Dezember 2015 wurde beschlossen, weitere Untersuchungen durchzuführen. Dazu wurden eine Kostenschätzung (21.12.2015) und ein Angebot (A15-083, vom 2.2.2016) abgegeben.

Die gegenständliche Fassung des Gefahren-Atlas Hangbewegungen ist dementsprechend eine erste vorläufige Fassung oder Zwischenbericht, der Bestand, Historie und Prozesse umfassend beschreibt, allerdings in folgenden Punkten aktualisiert / erweitert werden muss:

- Analyse geoelektrischer Messungen
- Gefährdung durch Großrutschungen und große Sturzprozess
- Messtechnisches Beweissicherungsprogramm
- Standardprofile und Standsicherheitsberechnungen

In den entsprechenden Kapiteln des Zwischenberichts werden Vermerke dazu gegeben.

1 Ziele

1.1 Veranlassung

Entlang der Habenschadenstraße über den Kirchplatz und die Heilmannstraße bis hin zur Karl-Schröder-Straße ist das westliche Isarhochufer im Gemeindegebiet von Pullach bis zur Hangkante bebaut und verschiedene Wege führen vom Hochufer hinunter zur Isar. In der Vergangenheit kam es immer wieder zu Steinschlägen, kleineren Felsstürzen und Rutschungen an der Hangkante, die Wege verschütteten oder die Stabilität der anliegenden Grundstücke gefährdeten.

Hangkanten wie das Isarhochufer sind natürlicherweise lediglich in einem „metastabilen“ Zustand und neigen dazu, sich durch erosive Prozesse landeinwärts rückzuverlegen. Diese Prozesse sind natürlich und laufen im Durchschnitt recht langsam ab (Verwitterung) bzw. treten als episodische (Stürze und Rutsche) und periodische (Erosion) Ereignisse auf.

Dem Einfluss des Menschen muss bei solchen metastabilen Verhältnissen besondere Beachtung geschenkt werden. Belastungen der Hangkante durch Bauwerke oder Verkehrslasten können sich genauso negativ auf die Standsicherheit der Hänge auswirken wie Entlastungen am Hangfuß (Abgrabungen, Isareintiefung). Eine ganz entscheidende Rolle für die Hangstabilität spielen zudem die natürliche Grundwasser-, Oberflächenwasser- und Drainagesituation, was beispielsweise durch die große Zahl von Bewegungsereignissen als Folge der langanhaltenden Niederschläge Ende Mai / Anfang Juni 2013 deutlich wurde ([U 9], [U 10], [U 11], [U 12]).

Die Baugeologisches Büro Bauer GmbH ist bereits seit dem Jahr 2003 mit geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Untersuchungen im Bereich der Gemeinde Pullach betraut. Darunter fallen auch verschiedene Schadensfälle durch Hangbewegungen am Isarhochufer. Am 6. August 2013 wurde die Baugeologisches Büro Bauer GmbH schließlich beauftragt, eine geologisch-geotechnische Gesamterfassung und Gefährdungsanalyse des Isarhangs im Bereich der Gemeinde Pullach zu erstellen.

Die Bearbeitung wurde in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl für Ingenieurgeologie (Prof. Dr. Thuro) und dem Fachgebiet Hangbewegungen (Prof. Dr. Krautblatter) der Technischen Universität München durchgeführt und ist in eine Masterarbeit (Daniel Davies) gemündet. Der Lehrstuhl für Ingenieurgeologie hat in der Vergangenheit bereits mehrere Abschlussarbeiten zu ähnlichen Themenbereichen im Isartal (z.B. in Grünwald etc.) bearbeitet.

1.2 Arbeitsgebiet

Die Gemeinde Pullach i. Isartal ist Teil des Landkreises München und liegt am westlichen Hochufer der Isar. Das Arbeitsgebiet erstreckt sich vom westlich der Isar verlaufenden Werkkanal bis an die Hangkante bzw. die hangnahe Bebauung. Im Norden reicht das Gebiet bis an die Burg Schwaneck, den südlichen Rand bildet die Grünwalder Brücke, womit eine Nord-Süd Erstreckung von ca. 1,9 km erreicht wird bei einer mittleren Breite von ca. 150 m.

Ursprünglich war gemäß dem Angebot an die Gemeinde vom 13.6.2013 vorgesehen, den Bereich der besiedelten Hangkante entlang der Habenschadenstraße über den Kirchplatz und die Heilmannstraße bis hin zur Karl-Schröder-Straße zu untersuchen. Die Arbeiten zeigten jedoch, dass es sinnvoll ist die Kartierung bis zur Grünwalder Brücke nach Süden auszudehnen, um die Dynamik des gesamten linksseitigen Isarhochufers von Pullach erfassen und interpretieren zu können.

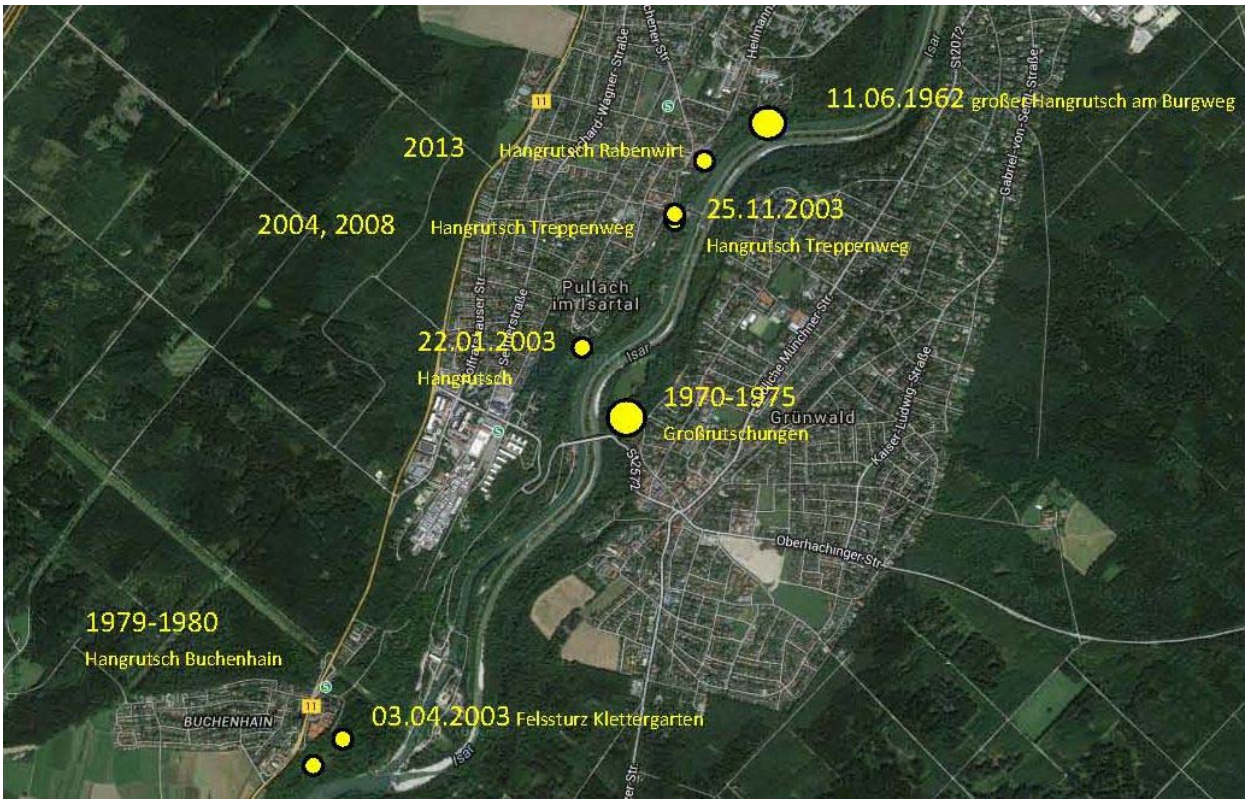


Abb. 1: Überblick des Arbeitsgebietes und seiner weiteren Umgebung mit Eintragung einiger historischer Rutsch- oder Sturzereignisse. Das Arbeitsgebiet befindet sich im oberen Abschnitt, nördlich der Grünwalder Brücke. Besonderes Ausmaß hatten die Großrutschungen im Bereich der Brücke in den siebziger Jahren sowie der große Abbruch am Burgweg 1962.

1.3 Aufgabenstellung und Ziele

Um die geologische, geotechnische und hydrogeologische Situation entlang der Hangkante im Gemeindegebiet von Pullach beurteilen zu können, soll eine umfassende Studie und Erhebung

aller relevanten Parameter durchgeführt werden. Wesentliche Erhebungsmerkmale sind dabei: Verbreitung, Eigenschaften und Zustand der Fest- und Lockergesteine, Grund- und Schichtwasserverhältnisse, Kenntnis der Hangbewegungsphänomene, präzise Verformungsmessdaten, anthropogene Eingriffe, Standsicherheitsbetrachtungen und anderes mehr.

Mithilfe dieser Erhebung und Dokumentation sollen thematische Kartensätze erstellt werden, beginnend mit hochauflösenden geologischen Karten (Maßstab 1:1.000) inklusive Erfassung aller Hangbewegungsphänomene. Diese sind schließlich die Basis für die Gefahrenkarten, in denen verschiedene Gefährdungsbilder (Sturz- und Rutschgefährdungen), potentiell betroffene Ablagerungsgebiete sowie erosionsgefährdete Bereiche dargestellt sind. Auch der Grad der Gefährdung kann abgeleitet werden.

Dieser Datensatz soll schließlich als Grundlage für verschiedene behördliche Prozesse wie Baugenehmigungen, Sanierungsplanungen, Wegerhaltung u.v.m. Verwendung finden. Des Weiteren besteht durch die Einbindung der gewonnenen Daten in das Geoinformationssystem (GIS) der Gemeinde Pullach die Möglichkeit, die so erstellte geotechnische Zustandserfassung und Gefahrenbeurteilung im Laufe der Zeit zu aktualisieren und zukünftige Gefährdungen zu beurteilen.

Um diese Daten zu erhalten, wurde eine flächendeckende geologisch-geotechnische Kartierung des Hanges von der Isar bis hinauf zur Straße durchgeführt, des Weiteren wurden Bodenproben im Labor auf Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte untersucht und Sondierungen abgeteuft. Vermessungsdaten wurden zur Erstellung eines digitalen Geländemodell (DGM) zur Kartierung aber auch als topographische Grundlage für die Bearbeitung in einem Geoinformationssystem verwendet. Weitere Beobachtungen (Bewegungsmessungen des LfU etc.) und vorhandene Gutachten und Stellungnahmen werden recherchiert und ausgewertet.

Alle Ergebnisse und Erkenntnisse werden in diesem Erläuterungsbericht „Gefahren-Atlas Hangbewegungen der Gemeinde Pullach“ mit GIS-fähigen Visualisierungen (Karten) dargestellt.

1.4 Verwendete Unterlagen

Für die Bearbeitung wurde eine Reihe von Unterlagen herangezogen, die eine Auswahl an repräsentativen Artikeln, Stellungnahmen und Gutachten darstellen. Die Auswahl ist Ergebnis der umfangreichen Recherche, kann allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Die Unterlagen und Quellen werden dabei thematisch wie folgt gruppiert:

Begutachtungen durch die Baugeologisches Büro Bauer GmbH im Projektgebiet:

[U 1] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2004): Begutachtung des Isarhanges in Pullach („Treppenweg“, ca. 300m südlich der Kirche).- Gutachten nach Hangrutschereignis vom Herbst 2003; März 2004.

[U 2] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2005): Begutachtung des Isarhanges in Pullach („Kalkofenweg“).- Gutachten; Juni 2005.

[U 3] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2008): Begutachtung der Hangbewegungssituation am Treppenweg; Pullach im Isartal.- Gutachten nach Hangrutschereignis vom April 2008; Juli 2008. (BBB-Projekt-Nr. 01103)

[U 4] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2009): Geophysikalische Untersuchungen auf dem Gemeindegebiet von Pullach.- Geologisch-geotechnische Stellungnahme; August 2009. (BBB-Projekt-Nr. 01553)

[U 5] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2010): Standsicherheitsberechnung des „Kalkofenwegs“.- Geologisch-geotechnische Stellungnahme; Februar 2010. (BBB-Projekt-Nr. 01753)

[U 6] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2011): Erneuerung Brückenweg Pullach.- Geologisch-geotechnischer Bericht; Mai 2011. (BBB-Projekt-Nr. 02163)

[U 7] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2012): Bauvorhaben Gabriel-von-Seidl-Straße 41, Pullach im Isartal.- Geologisch-geotechnischer Bericht; Mai 2012. (BBB-Projekt-Nr. 02402)

[U 8] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2013): Verlegung einer Fernwärmeleitung in der Habenschadenstraße, Pullach im Isartal - Bewertung möglicher geotechnischer Auswirkungen der Baumaßnahmen auf die Hangstabilität unter Berücksichtigung der Hausanschlüsse Habenschadenstraße 11, 17 und 21.- Geologisch-geotechnischer Bericht; Juni 2013. (BBB-Projekt-Nr. 02675)

[U 9] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2013): Untersuchung der Rutschungen am Treppenweg in Pullach nach dem Starkregenereignis vom Mai 2013.- Geologisch-geotechnischer Bericht; Juni 2013. (BBB-Projekt-Nr. 02733)

[U 10] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2013): Untersuchung der Hangstabilität am Kalkofenweg in Pullach nach dem Starkregenereignis vom Mai 2013.- Geologisch-geotechnischer Bericht; Juni 2013. (BBB-Projekt-Nr. 02733)

[U 11] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2013): Untersuchung der Hangstabilität an der Habenschadenstraße 15 und 17 in Pullach nach dem Starkregenereignis vom Mai 2013.- Geologisch-geotechnischer Bericht; August 2013. (BBB-Projekt-Nr. 02733)

[U 12] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2014): Begutachtung der Hangbewegungssituation am Kirchplatz 1 beim Rabenwirt, Pullach im Isartal.- Geologisch-geotechnischer Bericht; August 2014. (BBB-Projekt-Nr. 02863)

[U 13] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2014): Begutachtung des Isarhangs am Hermes Firmengelände in der Georg-Kalb-Straße, Großhesselohe.- Geologisch-geotechnischer Bericht; September 2014. (BBB-Projekt-Nr. 03183)

[U 14] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2015): Regenwasserbeseitigung Pullach - Planung einer Tiefenentwässerung in der Jaiser-Straße / Johann-Bader-Straße.- Hydrogeologisch-geotechnischer Bericht; Februar 2015. (BBB-Projekt-Nr. 01489)

[U 15] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2015): Habenschadenstraße 7.- Stellungnahme zur Stabilitätssituation des Isarhochufers; April 2015. (BBB-Projekt-Nr. 02863-1)

[U 16] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2016): Schwertransport Münchener Straße –

Kirchplatz – Heilmannstraße, Pullach im Isartal – Bewertung möglicher Auswirkungen auf die Hangstabilität.- Stellungnahme, Januar 2016. (BBB-Projekt-Nr. 03683)

Grundlagenliteratur - Regionale Geologie:

[U 17] BGLA (1995): Geologische Karte von München, L7934, 1 : 50 000.- München (BGLA).

[U 18] BGLA (1953): Geologisch-hydrologische Karte von München, mit hydrologischem Deckblatt, 1 : 50 000.- München (BGLA).

[U 19] Meyer, R.K.F. & Schmidt-Kahler, H. (1997): Wanderungen in die Erdgeschichte (8): Auf den Spuren der Eiszeit südlich von München – östlicher Teil.- München (Pfeil).

[U 20] Baumann, H.J. (1988): Bruchvorgänge in Folge der Isareintiefung südlich Münchens und die kritischen Höhen der Talhänge.- Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität, Schriftenreihe, Heft 12.

[U 21] Baumann, H.J. (2014): Ingenieurgeologische und geotechnische Exkursion im Isartal.- Exkursionsführer.

[U 22] Baumann, H.J. & Gallemann, Th. (1995): Einwirkung von Rutschmassen auf eine alte Stahlbetonbrücke über die Isar.- Vortrag, 10. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, Freiberg, Mai 1995.

[U 23] Baumann, H.J. & Gallemann, Th. (2002): 30 Jahre Beobachtung einer Rutschung im Isartal bei München. – In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: Tagungsband der 12. Donau-Europäischen Konferenz Passau, 215-217; Essen.

[U 24] Baumann, H.J., Kranzenberger, A. & Kröger, J. (1975): Beschreibung einer Rutschung südlich von München.- Geologica Bavarica, 74: 193-208.

[U 25] Bauer, M., Neumann, P., Scholz, M. & Thuro, K. (2005): Die Geologie des Münchener Untergrunds und seine Bedeutung für die Baugrundmodellbildung in städtischen Gebieten.- Geotechnik, 28 (2): 83-92.

[U 26] Lemcke, K. (1998): Geologie von Bayern I. Das bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit. 175 S., Schweizerbart, Stuttgart.

[U 27] Gallemann, Th. (2012) Geodätische und geotechnische Langzeitbeobachtungen an einer Rutschung im Isartal südlich von München. – VDVmagazin, 6/2012: 474-479.

Grundlagenliteratur - Bachelor-Arbeiten TU München:

[U 28] Biersack, F. (2008). Kartierung der Hangbewegungsphänomene am rechten Isarufer bei Grünwald.- Bachelorarbeit TU München, August 2008.

[U 29] Scherzer, K. (2009): Kartierung der Hangbewegungsphänomene am Hochufer der Isar bei Grünwald.- Bachelorarbeit TU München, August 2009.

[U 30] Starace, C. (2009): Kartierung der Hangbewegungsphänomene am linken Isarufer bei Pullach.- Bachelorarbeit TU München, August 2009.

[U 31] Steinsdörfer, J. (2009): Kartierung der Hangbewegungsphänomene am Hochufer der Isar

bei Pullach.- Bachelorarbeit TU München, August 2009.

[U 32] Leinauer, J. (2014): Quartärgeologische Kartierung im Isartal westlich Kloster Schäftlarn.- Bachelorarbeit TU München, August 2014.

[U 33] Staudacher, M. (2014): Quartärgeologische Kartierung im Isartal westlich Schäftlarn.- Bachelorarbeit TU München, August 2014.

Grundlagenliteratur - Massenbewegungen, Gefährdungsanalyse, Gefahrenhinweiskarten, Georisiken:

[U 34] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2010): Hanganbrüche. – 2 S., http://www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen/definition_massenbewegungma/doc/hanganbrueche.pdf, abgerufen am 18.08.2015.

[U 35] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2010): Rutschung. – 3 S., http://www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen/definition_massenbewegungen/doc/rutschung.pdf, abgerufen am 18.08.2015.

[U 36] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2010): Steinschlag. – 3 S., http://www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen/definition_massenbewegungen/doc/steinschlag.pdf, abgerufen am 18.08.2015.

[U 37] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2010): Felssturz. – 3 S., http://www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen/definition_massenbewegungen/doc/felssturz.pdf, abgerufen am 18.08.2015.

[U 38] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2012): Gefahrenhinweiskarte Bayerische Alpen - Schutz vor Georisiken: Erfahrungen und praktische Umsetzung.- Bericht zur Fachtagung am 27. März 2012.

[U 39] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2003): Abschlussbericht zum Projekt „CatchRisk - Felsstürze, Phase 1: Bewertungsmatrix“.- Bericht, Oktober 2003

Weitere Gutachten und Stellungnahmen für das Pullacher Isarhochufer:

[U 40] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2004): Erneuerung einer DHH, Habenschadenstraße 13 in Pullach (Anwesen Poetis); Standsicherheit des Isarhangs. – Gutachten vom 15.11.2004.

[U 41] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2013): Abschließender Bericht zu den messtechnischen Beobachtungen im Isarhang zwischen Badstraße und Habenschadenstraße.- Stellungnahme vom 18.11.2013.

[U 42] Weinhold, H. (1987): Bauvorhaben Rolf Becker an der Habenschadenstraße 33 in 8023 Pullach; Baugrunderkundung und Stellungnahme zum Baugrund und zur Gründung.- Baugrundgutachten mit Anlagen vom 16. Juni 1987.

[U 43] Schäfer, I. (1962): Geologisches Gutachten über die Hangrutschungen am Isar-Steilhang von Pullach.- Gutachten vom 21.08.1962.

[U 44] Jelinek, R. (1962): Sicherheitsmaßnahmen am Isarhang in Pullach, Gefährdung des

Wohngebäudes Pullach, Burgweg 2.- Gutachten vom 29.10.1962.

[U 45] Bayerisches Landesamt für Umwelt (1963): Erkundungsbohrungen zur Hangstabilität im Bereich der Burg Schwaneck, Pullach i. Isartal, München.

[U 46] Müller, L. (1964): Baugeologisches Gutachten über die Standsicherheit des Isartal-Hanges im Bereich der Burg.- Zweiter Bericht vom 24. März 1964.

[U 47] Floss, R. (1993): Neubau Bürgerbräuterrassen, Pullach bei München - Gutachterliche Stellungnahme zur Standsicherheit des Gebäudes, insbesondere Böschungsbruchuntersuchungen für die hangnahen Gründungskörper und gutachterliche Stellungnahme zur Sicherung der nördlich angrenzenden Nachbarbebauung.- Gutachten vom 21. Mai 1993.

[U 48] Floss, R. (1999): „Bürgerbräuterrassen“, Pullach im Isartal.- Prüfbericht vom 20. April 1999.

[U 49] Jung, R.G. (2003): Gutachten zum Beweisbeschluss des Landgerichts München I vom 28.8.2002, Habenschadenstraße 13.- 23. Mai 2003.

[U 50] Landesamt für Umwelt LfU (2004): Erneuerung einer DHH, Habenschadenstraße 13 in Pullach (Anwesen Poetis); Standsicherheit des Isarhangs.- Stellungnahme Dr. Baumann, 15.11.2004.

[U 51] Udluft, P. (1982): Baugrundgeologisches Gutachten für das Grundstück Fl.Nr. 40/5 an der Habenschadenstraße 29 in Pullach/Isartal.- Gutachten von 1982.

[U 52] Lempe, B. V. (2012): Die geologischen Verhältnisse auf der GK25 Blatt Nr. 8027 Memmingen unter besonderer Berücksichtigung der Verwitterungserscheinungen in pleistozänen Schmelzwasserschottern und deren Einfluss auf ihre bautechnischen Eigenschaften. Entwicklung einer Verwitterungsklassifizierung. – Dissertation Technische Universität München.

[U 53] Elbracht, J. (2002): Karbonatische Zementation pleistozäner Lockersedimente NW-Deutschlands.– unveröffentlichte Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften und Geographie der Universität Hannover, 214 S.; Hannover.

[U 54] Klein S. (1940): Die Nagelfluhbildungen im Eiszeitalter. – Zentralblatt für Mineralogie etc., **10**: 289-306; Stuttgart.

[U 55] Vogt, N. (2014): Gutachterliche Beurteilung der Hangstabilität, Wohngebäude Habenschadenstraße 8. – Gutachten, Zentrum Geotechnik TU München, 11.06.2014.

Weitere Literatur und Internetquellen:

[U 56] http://www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen/gefahrenhinweiskarten/index.htm [Abgerufen am 24.08.2015]

[U 57] Hack, R. (2000): Geophysics for slope stability. – Surveys in Geophysics, 21: 423-448.

2 Methodik und Untersuchungen

Nach den vielen, z.T. umfangreichen Untersuchungen der vergangenen über 50 Jahre erfolgt in diesem Gutachten nun die Zusammenführung der relevanten Ergebnisse und eine gesamtheitliche Betrachtung des westlichen Isarufers bei Pullach. Grundlage dafür ist eine detaillierte geologisch-geotechnische Aufnahme des Projektgebietes, deren anschauliche Darstellung sowie weitere geologisch-geotechnische Untersuchungen, wie im Folgenden beschrieben.

2.1 Geologische Kartierung

Mit der Feldarbeit wurde Mitte Dezember 2013 begonnen. In den darauffolgenden Monaten konnte dank des milden Winters ein Großteil der Kartierung durchgeführt werden. Die Kartierung wurde im Maßstab 1:500 durchgeführt und wird in zwei Teilblättern im Maßstab 1:1000 zusammengefasst. Grundlage für die Kartierung ist ein Höhenmodell, welches aus den dmg2-Daten des Landesvermessungsamts erstellt wurde.

Bei der Kartierung der geologischen Einheiten liegt der Schwerpunkt auf dem Ausstreichen des Konglomerates und des Flinz im Hangprofil. Ersteres ist maßgebend für die Stabilität des gesamten Hanges und gleichzeitig u.a. Liefergebiet für die zahlreichen dokumentierten Sturzprozesse von kindskopfgroßen Steinen bis zu mehreren 10er m³ großen Sturzmassen. Unterschiedliche Zementationsphasen des Konglomerates, die bei einigen Detailgutachten differenziert wurden (z.B. [U 1], [U 3]), sind in dieser Arbeit nicht gesondert dargestellt. Der Fokus bei der Festigkeit bzw. Entfestigung des Konglomerates wurde indes auf Trennflächen mit mittel bis sehr großen Kluftkörpern und überhängenden Felswänden gelegt, die in der geologischen Karte hervorgehoben sind. Die absolute Höhe des Flinz ist ein wichtiger Faktor für rechnerische Stabilitätsanalysen und ein grundlegendes, stratigraphisches Einordnungsmerkmal für die gesamte Gesteinsfolge. In der Regel ist der Flinz nicht direkt im Hangprofil anstehend und kann nur durch natürliche Quellaustritte und Vernässungszonen eingegrenzt werden. Die Lokalitäten und Höhen wurden, falls möglich, exakt bestimmt und in die Karte übernommen. Weitere wichtige Faktoren für eine Abschätzung der Hanggefährdung durch Massenbewegungen sind Abbruchkanten, defekte und intakte Hangsicherungen, anthropogen überprägte Flächen und natürlich die abgelagerten Sturz- und Rutschmassen. Diese Relikte vergangener Hangbewegungen, auch stumme Zeugen genannt, sind bei der weiteren Auswertung ein wichtiger Hinweis bei regionaler Differenzierung und der Analyse der Aktivität.

Neben diesen geologischen, hydrologischen und morphologischen Punkten wurden im Zuge der Kartierung noch weitere Daten für die unterschiedlichen Kartensätze zusammengetragen. Die im Rahmen der Recherche am LfU gesammelten Daten von Sondierungen wurden, sofern aus ihnen

ein deutlicher Informationsgewinn entspringt, lagegetreu in die Karte übernommen. Zur Orientierung auf dem Kartenblatt sind die größten bzw. relevanten Straßen und Wege, Gebäude sowie auffällige Vegetation oder umgestürzte Bäume verzeichnet.

2.2 Historische Recherche

Die historische Recherche umfasste ein ausgiebiges Literaturstudium in Archiven der TU München und des Landesamts für Umwelt in Augsburg (LfU). Wertvolle Daten und Informationen wurden zudem Herrn Dr. von Poschinger und Herrn Gallemann vom LfU sowie dem Gemeindearchivar von Pullach, Herrn Erwin Deprosse, und dem langjährigen Kenner der Isarhänge, Herrn Dr. Hans Jürgen Baumann, zur Verfügung gestellt.

Die Recherche beinhaltet Bestandsdaten wie ausgewählte Baugrundgutachten, Stellungnahmen zu Sanierungen, Zeitungsartikel, aber auch amtliche Datenbanken zu Bohrungen, Grundwassermessstellen und Messeinrichtungen (z.B. Extensometer). Darüber hinaus wurden Studienarbeiten und Promotionen herangezogen.

2.3 Erhebung von Aufschlüssen und Labordaten

Sämtliche aufgefundenen künstlichen Aufschlüsse wie z.B. Bohrungen und Sondierungen des letzten halben Jahrhunderts wurden ausgewertet und lagegetreu in den Kartensätzen eingetragen. Gleiches gilt für die Messeinrichtungen. Um eine einheitliche Darstellung der unterschiedlichen Aufschlüsse zu erhalten, wurden sie wie in Tab. 1 zusammengefasst und bezeichnet.

Tab. 1: Zusammenfassung der in der geologischen Karte verwendeten Abkürzungen für technische Einrichtungen.

Aufschlussart / Monitoring	Abkürzung
Pegelbohrung (Kernbohrung + GW-Messstelle)	PB
vertikale Kern-/Rammkernbohrung	B
Schrägbohrung	SB
Horizontalbohrung	HB
Kleinrammbohrung	KRB
Hangbohrung mit Bohrstock	H
Leichte - / Schwere Rammsonde	S
Densitometer	D
Fixpunkt für Konvergenzmessung	M
Stangenextensometer	St.Ex.
Kluftspion	K

Eine Zusammenstellung der bodenmechanischen Daten aus diversen Gutachten ist in Kapitel 2.6 zu finden.

2.4 Installation von Deformationsmessungen

Insgesamt wurden vier **Konvergenzmessstrecken (KVM)** an drei ausgewählten Standorten des Projektgebiets eingerichtet. Sie dienen i.W. zur Bestimmung der Verformung im rutschanfälligen Hangschutt im Nachgang zu dem Schadensereignis im Jahr 2013.

Die Konvergenzmessung wird mit dem *E3 Digital Tape Extensometer* der Firma itmsoil durchgeführt (Abb. 2). Dabei handelt es sich um ein Drahtextensometer, welches zwischen zwei fixen Punkten gespannt wird und laut Hersteller die Entfernung auf ± 0,01 mm genau bestimmen kann. Die Fixierung an den jeweiligen Messpunkten erfolgte mit Hilfe von Schraubankern (HILTI HUS-I 6x35 M8/10), welche an Bäumen, Fels oder eigens eingerammten Holzpflöcken angebracht sind. Die Messpunkte wurden so gewählt, dass das gewünschte Messprofil in gleichmäßige Segmente unterteilt wird, zwischen denen dann jeweils die Entfernung bestimmt werden kann. Eine Stichtagsmessung setzt sich aus drei Einzelmessungen zusammen, wodurch Messfehler minimiert werden.

In den ersten drei Monaten der Messung seit Dezember 2013 wurde ein Messintervall von ca. 14 bis 30 Tagen gewählt. Von Ende März 2014 bis zum vorläufigen Messungsende April 2015 wurden die Messprofile im Abstand von ca. zwei Monaten überprüft. Neben den Entfernungen wurden auch noch die Niederschlagsmengen und die Temperatur am Messtag dokumentiert. Die Temperatur ist entscheidend bei der Korrelation der einzelnen Messungen, da sich das Stahlband und das Messgerät in Abhängigkeit der Temperatur um zehntel Millimeter verlängern oder verkürzen können. Die Wetterdaten werden über den kostenlosen WESTE-XL Dienst des Deutschen Wetterdienstes (DWD) bezogen, wo benachbarte Wetterstationen (z.B. Kloster Schäftlarn) abgefragt werden können. Die Auswertung erfolgte über eine excel-Tabelle, welche eine Temperaturkorrektur der Werte vornimmt und einen Vergleich der relativen sowie der absoluten Bewegungen und der Bewegungsraten ermöglicht (siehe Anlage 2). Die Auswertung sowie das Messgerät wurden freundlicherweise

Abb. 2: Gespanntes Extensometer an der KVM 1/8 mit Blickrichtung Werkkanal.

von Herrn Prof. Krautblatter (TU München) zur Verfügung gestellt.

Außerdem wurden z.T. schon vor mehreren Jahren sogenannte **Kluftspione** im Bereich des Treppenwegs sowie im Bereich Habenschadenstraße 13/15 eingerichtet. Diese messen die Abstände entlang natürlicher Klüfte im Konglomerat sowie von Rissen in Fundamenten oder Mauerwerk. Die Messintervalle sind unregelmäßig, reichen aber bereichsweise bereits bis 2005 zurück.

Es handelt sich um die Messpunkte M1-M5 im Bereich des Treppenwegs (Lageplan und Details in [U 3] und [U 9]), des Weiteren um die Messpunkte P1 bis P4 an Terrasse/ Mauerwerk der Habenschadenstraße 15/17 (Lageplan und Details in [U 11]).

Abb. 3: Beispiel von Mauer- und Kluftspionen, links: P3 Habenschadenstraße 17 (seit 2013), rechts: M1, Konglomeratüberhang am Treppenweg (seit 2005).

2.5 Untersuchung im Projektgebiet mittels Electrical Resistivity Tomography

Im Vorfeld geplanter Geothermie-Bohrungen wurden in Pullach bereits seismische Untersuchungen des tieferen Untergrunds durchgeführt. Im Rahmen dieser Studie wurde in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Hangbewegung der TU München (Prof. Krautblatter) eine Electrical Resistivity Tomography (ERT) quer zum Hang im Bereich der Joseph-Breher Straße erstellt.

Bei der ERT wird basierend auf dem Ohm'schen Gesetz der spezifische Widerstand im Untergrund ermittelt. Dieser unterscheidet sich von Gestein zu Gestein aufgrund unterschiedlicher Mineralzusammensetzungen, Wassergehalte und Porositäten. Die Bestimmung des Widerstandes geschieht durch zwei Elektroden, die eine konstante elektrische

Spannung in den Boden einbringen. An zwei weiteren Elektroden wird parallel dazu an anderer Stelle im Profil die Potentialdifferenz gemessen und daraus der Widerstand errechnet. Der Abstand, auch Array genannt, der vier messenden Elektroden zueinander, ist entscheidend, bis in welche Tiefe und mit welcher Auflösung gemessen werden kann. Für die ERT Messung wurde ein durch Prof. Krautblatter modifiziertes Schlumberger – Wenner – Array verwendet. Es erreicht eine maximale Messtiefe von 1/6 der Profillänge, was bei einer Profillänge von 280 m einer Tiefe von ca. 46 m entspricht. Die Länge der Profillinie, im Waldstück zwischen den Ortsteilen Pullach und Höllriegelskreuth, war durch den Werkkanal im Osten und die Bahnlinie im Westen begrenzt (Abb. 4). Entlang der Profillinie wurde ein spezielles Messkabel verlegt, sodass im Abstand von 5,0 m jeweils Edelstahlnägel als Elektroden in Boden und Fels eingebracht werden konnten (Spacing). Die Steuerung erfolgte mit dem ABEM Terrameter SAS 1000 und den Geräteeinstellungen: 50 Hz und 100 mA. Das Gerät erkennt bei der Messung die Wechselstromeinflüsse, die von Kabeln im Untergrund ausgehen, und kann diese aus der Messung herausfiltern.

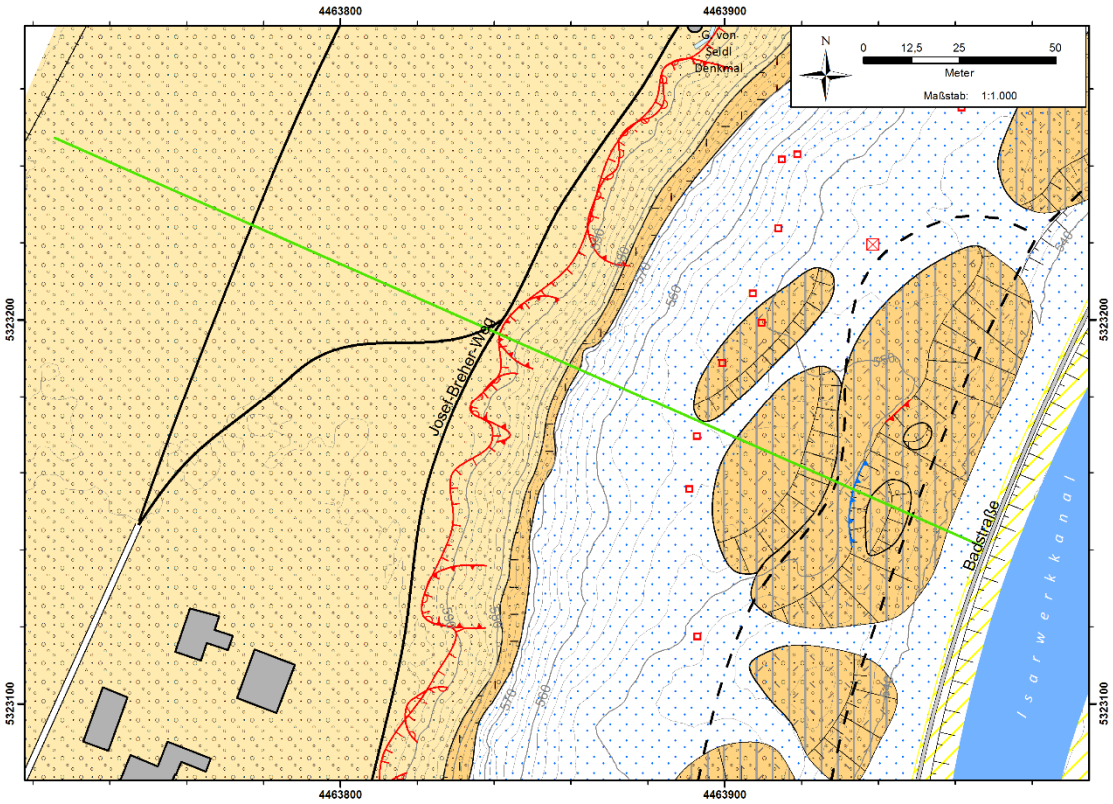


Abb. 4: Profillinie der ERT-Messung zwischen den Ortsteilen Pullach (N) und Höllriegelskreuth (S).

Die Auswertung erfolgte mit dem Programm RES2DINV der Firma Geotomo Software. Für die Auswertung wird neben den Daten der Geoelektrik-Messung auch die topographische Verortung der Messpunkte benötigt. Hierfür wurde im Abstand von 2,5 m entlang der Profillinie mit einem analogen Neigungsmesser die Topographie gepeilt. Für die Darstellung der Widerstände im

Untergrund wertet das Programm, für ein Netz aus Datenpunkten, die Ergebnisse der Messung aus. Zwischen diesen tatsächlich gemessenen Werten kann RES2DINV durch Interpolation ein feineres und somit detaillierteres Netz aus Datenpunkten im Untergrund berechnen.

Um ein möglichst genaues Bild und geringe Fehler zu erhalten, werden bei der Auswertung folgende Einstellungen vorgenommen: die eben erwähnte Interpolation zwischen Datenpunkten (model refinement – halber Zellenabstand), Verhinderung der Glättung von Zellen (robust inversion – robust constrain), damping factor (0,15) sowie eine logarithmische Darstellung der Werte. Dies bedeutet, dass jeder Farbunterschied in der Auswertung der Geoelektrik-Messung einer Verdopplung des Widerstandes entspricht. Einen Anhaltspunkt für die Einstufung der berechneten spezifischen Widerstände gibt folgende Tabelle [U 57]:

Tab. 2: Spezifische Widerstände der Gesteine im Untergrund von Pullach [U 57].

Material	Widerstand [Ωm]
Schotter (unverfestigt)	100-600
Konglomerat, verfestigte Schotter	600-1000
Tertär / Ton	10-100

Kommentar: Die Ergebnisse der Tomografie werden erst im Abschlussbericht detailliert ausgeführt und diskutiert, da weitere Untersuchungen im Jahr 2016 geplant sind.

2.6 Bodenkennwerte – Literaturstudie und ergänzende Analytik

Im Rahmen der Bestandsdatenerfassung wurden zudem Kennwerte der Boden- und Felsschichten aus verschiedenen Quellen (Publikationen, Gutachten) zusammengestellt (Kapitel 5.7).

Des Weiteren wurden spezielle Untersuchungen (Labor- und Feldversuche) an durch Lockergesteinsrutschungen gefährdeten Bereichen Treppenweg, Habenschadenstraße 15 und Rabenwirt durchgeführt:

Korngrößenverteilung des rutschanfälligen Materials mittels kombinierter Sieb-/ Schlämmanalyse nach DIN 18123-5/-6.

In-Situ **Dichtebestimmung** der obersten Lockergesteinsschichten mittels Densitometer (Ballonverfahren) nach DIN 18125-2.

In-Situ **Lagerungsdichtenbestimmung** bis maximal 10,9 m Tiefe mittels leichter Rammsonde (DPL-5) (DIN 4094-3).

2.7 Generalisierende Standsicherheitsanalysen

Im Rahmen früherer Bearbeitungen wurden Standsicherheitsanalysen durch BBB an folgenden Profilen durchgeführt. Erkenntnisse daraus gehen in diesen Bericht ein.

Tab. 3: Zusammenstellung durch BBB berechneter geotechnischer Querprofile.

Geotechnische Querprofile
Geotechnisches Profil Kirchplatz 1 [U 12]
Geotechnisches Profil 350 Habenschadenstraße 11 [U 8]
Geotechnisches Profil 297 Habenschadenstraße 17 [U 8]
Geotechnisches Profil 250 Habenschadenstraße 21 [U 8]
Geotechnisches Profil 110 Habenschadenstraße 25 [U 3] [U 4]
Geotechnisches Profil Kalkofenweg [U 5]
Geotechnisches Profil Habenschadenstraße 7 [U 15]
Geotechnisches Profil Heilmannstraße 5 [U 16]

Modellierungen mit der Software Slide2D 6.0 am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU München

Im Rahmen des vorliegenden Zwischenberichts werden beispielhaft zwei Standsicherheitsanalysen geführt, die sich jeweils mit einer Lockergesteins- und einer Rotations-/Translationsrutschung auseinandersetzen. Diese Berechnungen wurden im Rahmen der Masterarbeit am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie durchgeführt.

Hierfür wird das Programm Slide2D 6.0 der Firma rocscience verwendet, einem 2D Programm zur Modellierung von Hängen und Böschungen. Dieses ermöglicht die Berechnung der Standsicherheit von natürlichen Böschungen und Hängen in Hinblick auf Rutschereignisse. Es berechnet für eine vorgegebene Anzahl an potentiellen Gleitflächen die jeweils zugehörigen Sicherheitsbeiwerte (factor of safety FoS). Der Sicherheitsbeiwert ist das Verhältnis aus rückhaltenden zu treibenden Kräften. Somit ergibt ein FoS > 1 einen stabilen Hang, ein FoS = 1 ein Hang im Grenzgleichgewicht und Hänge mit einem FoS < 1 sind nicht stabil. Die Ergebnisse werden mit einer Gesamtsicherheit angegeben, Teilsicherheiten gemäß Eurocode 7 sind in den Berechnungen nicht enthalten. Die rückhaltende Wirkung der Vegetation, v.a. für kleine Hanganbrüche, ist in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Quantitativ ist die Wirkung schwer

abzuschätzen und folglich ein zu ungenauer Faktor für die Standsicherheitsberechnungen. Die Berechnungsgrundlage bestehend aus dem Profil mit den zugehörigen geologischen Schichten, dem Grundwasserspiegel und den entsprechenden Materialparametern (Mohr-Coulomb Bruchkriterium, Wichte, Kohäsion, Reibungswinkel) kann graphisch eingegeben werden und ist in Kapitel 6.5 zusammengefasst. Für die Berechnungen muss zudem noch das Berechnungsverfahren nach Janbu simplified und Bishop simplified und die Form der Gleitfläche festgelegt werden. Die Verfahren nach Janbu und Bishop berücksichtigen bei der Berechnung keine Scherspannungen, wobei mittels Lamellenverfahren (Janbu) und Momentengleichgewicht (Bishop) die Stabilität ermittelt wird. Die Form der berechneten Gleitflächen, circular oder non-circular, wurde jeweils an die zu erwartende Versagensart angepasst:

- „non-circular path search“ für die Gleitflächen von tiefgreifenden Rotations-/Translationsrutschungen,
- „circular grid search“ für die rotationsförmigen Gleitflächen der oberflächennahen Hanganbrüche mit den Zusatzoptionen der schichtübergreifenden Gleitfläche (composite surface) und der Möglichkeit von Zugrissen (tension crack).

In der finalen Darstellung der Berechnungsergebnisse wird der Gleitkreis mit dem niedrigsten FoS im Profil hervorgehoben. Die Mittelpunkte aller Gleitkreise werden entsprechend ihres FoS farblich auf einer Skala von einem FoS = 0 bis 2 dargestellt. Zur Bewahrung der Übersichtlichkeit wurden für die Berechnung der Rotations-/Translationsrutschung nur die 100 Gleitkreise mit den niedrigsten FoS dargestellt bzw. für die Berechnung der Hanganbrüche die Gleitkreise mit einem FoS < 1,5.

Modellierungen mit der Software GGU Stability 11.08 durch BBB GmbH

Die Standsicherheitsmodellierungen früherer und aktueller Projekte der BBB GmbH wurden gemäß Vorgaben europäischer und deutscher Normen (EC 7, DIN 1054 und DIN 4084) durchgeführt und beziehen sich auf das Teilsicherheitskonzept nach EC 7. Die Ergebnisse werden also als Auslastungsgrade µ angegeben. Für die Berechnungen wurde das Programm GGU Stability® verwendet.

Um verschiedene potentielle Versagensszenarien zu berücksichtigen (z.B. Abgleiten der Lockergesteinsdecke, Versagen der Nagelfluhwand), wurden die Standsicherheitsberechnungen mit unterschiedlichen Verfahren durchgeführt:

Beim Standard-Verfahren nach Bishop werden mögliche Gleitkreise gesucht und die ungünstigste Standsicherheit (=höchster Auslastungsrad) angegeben.

In einem weiteren Schritt wurden speziell ungünstige Trennflächen (Klüfte) in der Nagelfluh modelliert (z.B. mit 75° Neigung hangauswärts). Hier werden näherungsweise Versagen der Felsanteile (Nagelfluh) analog Burgweg 2 von 1962 berechnet.

Kommentar: Diese Ergebnisse werden in den Abschlussbericht einfließen.

2.8 GIS-Einbindung

Die Kartiergrundlage sowie die Darstellung der Kartierergebnisse erfolgte mit Hilfe des Programmes ArcGIS von ESRI (Version 10.1). Folgende Kartensätze werden unterschieden:

➔ Geologische Karten mit Darstellung der Hangbewegungsphänomene (1:1.000)

➔ Gefahrenkarten A, B, und C (1:4.000)

Die einzelnen Daten, Hangbewegungen, geologischen Einheiten und alle wie in der geologischen Karte bzw. der Legende dargestellten Objekte liegen als sog. shapefile vor. Dieses ist mittels dem Gauss-Krüger-Koordinatensystem (Deutsches Hauptdreiecksnetz DHDN, Zone 4) georeferenziert und kann mit einer passenden Software in bestehende Geoinformationssysteme eingebunden werden.

3 Geologischer Rahmen

3.1 Historische Geologie im Süden Münchens

Die Geologie im Süden Münchens ist geprägt von zwei erdgeschichtlichen Phasen, zum Einen der Zeit des Neogen mit der Ablagerung des „Flinz“, zum Anderen dem Zeitalter des Pleistozän mit der Bildung der glazialen Münchener Schotterebene. Die historische Geologie ist in zahlreichen Publikationen dargelegt (z.B. [U 17] [U 18] [U 19] [U 25] [U 26]) und wird daher nur in den Grundzügen ausgeführt.

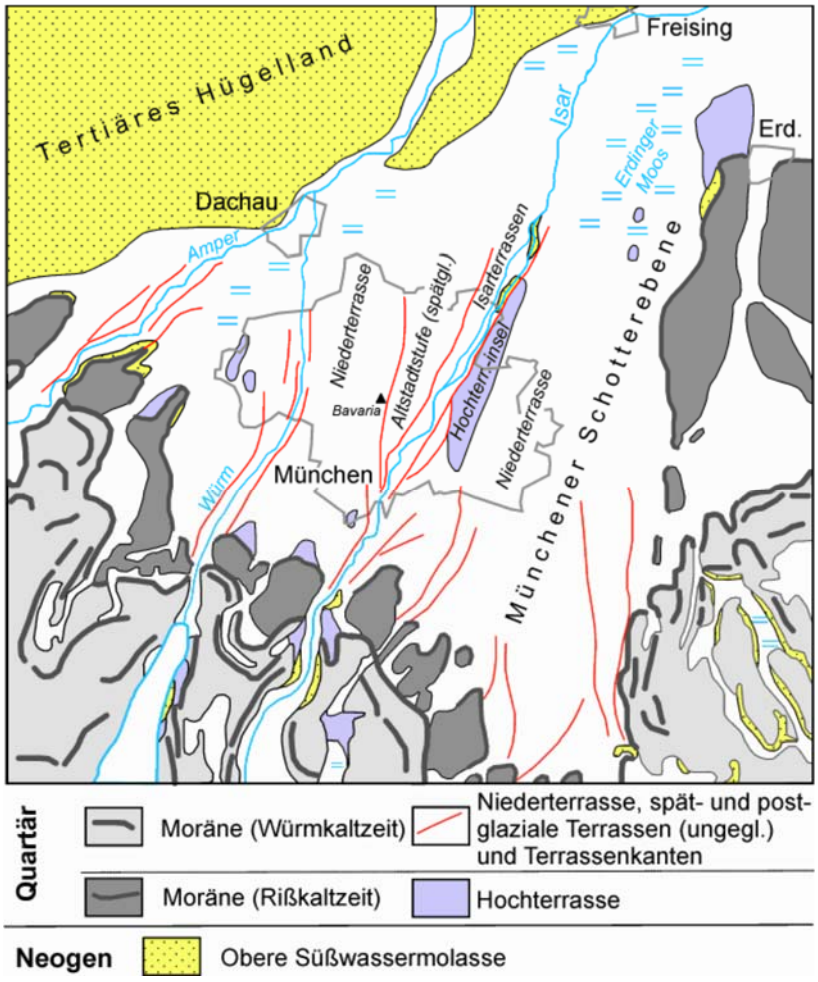


Abb. 5: Vereinfachter geologischer Überblick der Münchener Schotterebene (grau umrandete Fläche) zwischen der südlichen Moränenlandschaft und dem tertiären Hügelland [U 25].

In der Tertiärzeit (Paläogen und Neogen) senkte sich entlang der aufsteigenden Alpendeckenfront ein Vorlandbecken ein, in das Abtragungsschutt des Gebirges, die sogenannte Molasse, abgelagert wurde. Der jüngste Sedimentationszyklus, die Obere Süßwassermolasse,

bildet den tieferen Untergrund Münchens und Pullachs. Zu dieser Zeit, vor ca. 5 bis 17 Millionen Jahren (Miozän), war das Alpenvorland ein von Flussniederungen durchzogenes Sumpf- und Seenland mit warmem Klima. Im Bereich Pullachs herrschten Überschwemmungs- und Stillwasserbereiche vor, in denen i.W. Feinmaterial abgesetzt wurde, das heute als „Flinz“ erhalten ist.

Schließlich wurde das Gebiet aufgrund regionaler Hebungen zum Erosionsgebiet, in dem sich langsam ein ostgerichtetes Flusssystem als Vorläufer unseres heutigen formte. Seit dem ausgehenden Neogen bis in das beginnende Pleistozän wurden im Münchner Raum etwa 100 bis 200 m Lockergesteine bereits wieder abgetragen ([U 26]).

Seit gut 2,5 Millionen Jahren erhält die Landschaft des Projektgebiets ihre heutige Prägung mit der Ausbildung der Münchner Schotterebene. Ende des Neogens kam es zu einer drastischen Klimaabkühlung, lange Kaltzeiten im Pleistozän waren die Folge. Das Gebiet der Münchner Schotterebene war nicht vergletschert, sondern glaziales Abflussgebiet der Schmelzwässer des Isar-Loisach-Gletschers, die in breiten verflochtenen Strömen nach Nordosten abgeführt wurden und große Schotterfelder (Sander) auf der Molassebasis aufschütteten.

Durch die erosive Tätigkeit wurde die tertiäre Unterlage modelliert und ist daher eine von Rinnen und Furchen durchzogene Fläche, die noch in einzelnen Erhebungen inselartig aus der Schotterumrahmung herausragt.

Im Pleistozän lösten sich mehrere Vereisungsphasen mit entsprechenden Akkumulations- und Erosionsprozessen ab und verschiedene Schotterterrassen bildeten sich heraus. Die ursprüngliche Schotterterrassen-Stratigraphie und deren Nomenklatur geht auf Penck Anfang des letzten Jahrhunderts zurück. Die Terrassenabfolge im Norden und Süden Münchens ist sehr unterschiedlich. Während südlich von München akkumulative Prozesse während der Kaltzeiten dominierten und sich die Terrassen in einer normalen stratigraphischen Abfolge überlagern, ändert sich dies nördlich der Stadt. Hier herrschen die Niederterrasse sowie jüngere spät- und postglaziale Terrassen vor, ältere Terrassen wurden fast vollständig erodiert. Aufgrund dieser im Norden Münchens, aber auch andernorts (z.B. im Iller-Lech-Gebiet) herrschenden erosiven Eintiefung bis unter die Basis älterer Terrassen, wie der Hochterrasse, können jüngere Terrassen, wie z.B. die Niederterrasse, eine tiefere topographische Position einnehmen. Daraus leitet sich die Nomenklatur der Terrassen im bayerischen Alpenvorland ab.

Die folgende Abbildung zeigt die Terrassen-Stratigraphie im Süden Münchens.

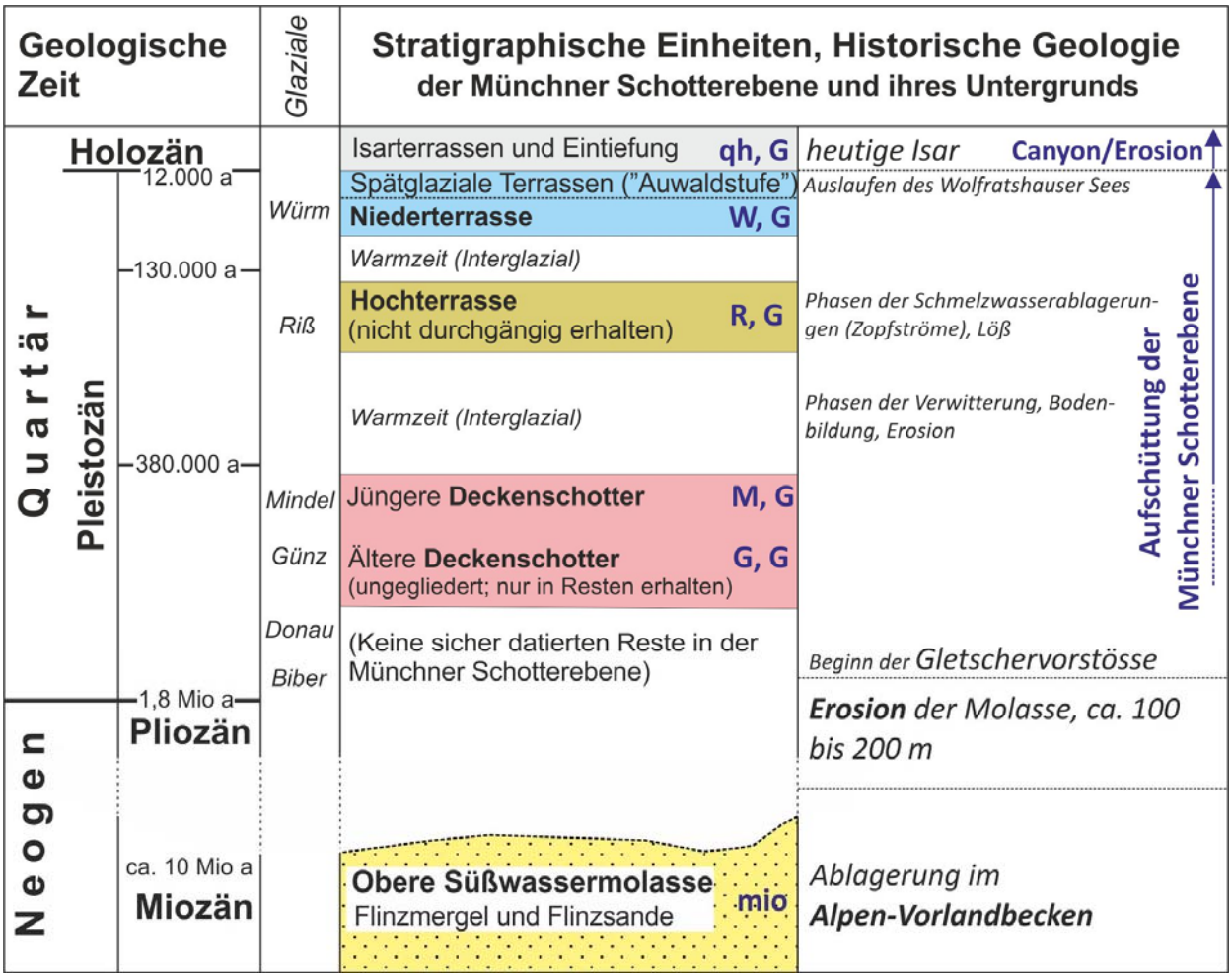
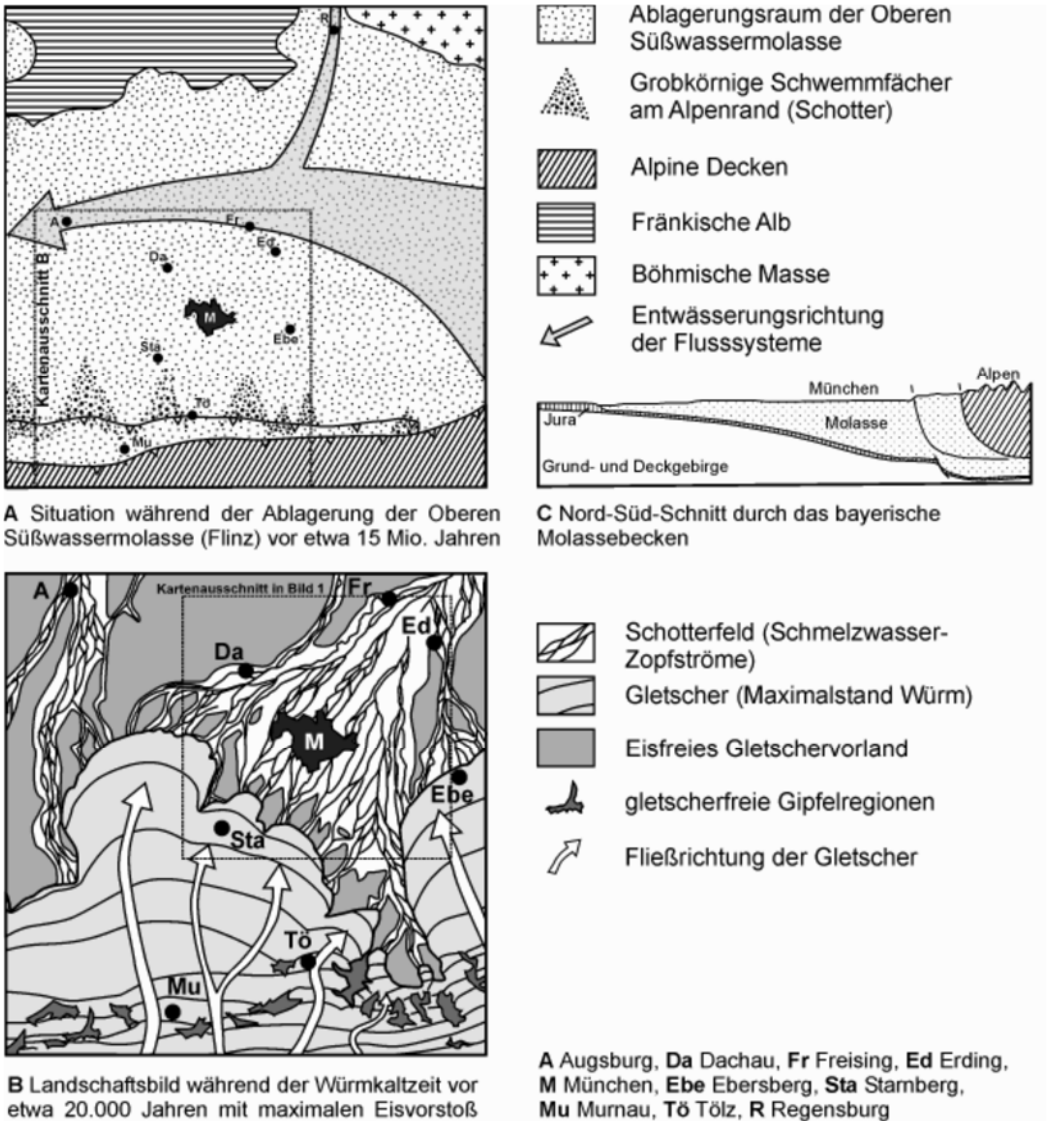


Abb. 6: Erdgeschichtliche Tabelle für München und Pullach (nach [U 25]). Die Abkürzungen bezeichnen die Formationen gemäß amtlichen Kartenblatt von München 1:50.000 [U 17]. Das Isarhochufer in Pullach wird i.W. von dem Flinz (mio) aufliegenden jüngeren Deckenschottern (M, G) und rißzeitlicher Hochterrasse (R, G) aufgebaut.



A Situation während der Ablagerung der Oberen Süßwassermolasse (Flinz) vor etwa 15 Mio. Jahren

C Nord-Süd-Schnitt durch das bayerische Molassebecken

B Landschaftsbild während der Würmkaltzeit vor etwa 20.000 Jahren mit maximalen Eisvorstoß

A Augsburg, **Da** Dachau, **Fr** Freising, **Ed** Erding, **M** München, **Ebe** Ebersberg, **Sta** Starnberg, **Mu** Murnau, **Tö** Tölz, **R** Regensburg

Abb. 7: Paläogeographie Münchens und Pullachs in zwei erdgeschichtlichen Phasen ([U 19] [U 25]).

3.2 Neogener Flinz

Hauptbestandteil der Oberen Süßwassermolasse im Untergrund Pullachs sind grüne, gelbgrüne, braune bis bläuliche Tone und Schluffe, mergelige Tone und Schluffe, Mergel und glimmerreiche Fein- bis Mittelsande. Diese werden als „Flinz“ bezeichnet. Gröberkörnige Ablagerungen wie Sande oder quarzreiche und kristallinführende Kiese und Kies/Sand-Gemische sind nicht erschlossen.

Der Begriff „Flinz“ leitet sich aus dem bayerischen Wortgebrauch (flinseln / flimmern) ab, womit auf den Gehalt an Glimmer in den Feinsanden und Mergeln hingewiesen wird. Im Münchner Raum war daher seit jeher bei Brunnengräbern und Bauleuten vom Flinz als Formation unterhalb der Schotter und Kiese die Rede.

Die Tone, Schluffe und Feinsande können Feinschichtung zeigen und linsen- oder lagenförmig ausgebildet sein. Sie lagern sich in strömungsärmeren Bereichen von Flussgerinnen ab, können aber auch außerhalb derselben als Uferwälle, Hochflut- und Altwassersedimente auftreten oder auch Seesedimente darstellen.

Die Böden sind aufgrund der ehemaligen hohen Überlagerung vorbelastet und überkonsolidiert. Bindige Böden weisen daher halbfeste bis feste Konsistenzen auf und sind bisweilen sehr hart, Sande haben hohe Lagerungsdichten und zeigen das Phänomen der scheinbaren Kohäsion. Tone und Mergel zeigen zudem oftmals eine intensive Durchsetzung mit Kleinharnischen in allen Raumrichtungen in mm- oder cm-Abständen (Bröckeltone).

3.3 Pleistozäne Schotterterrassen

Die Terrassen bestehen aus Kieskörpern, die als weitflächige Kiesbänke in breiten Zopfströmen ab- und umgelagert wurden. Das Korngrößenspektrum reicht von schluffig-sandigem, kiesigem bis zu steinigem Material. Sortierung und Klassierung schwanken stark (sandige Kiese, Rollkiese), horizontale und schräge Schichtungsgefüge treten auf. Hochflutsedimente können als einzelne Sand- oder Schlufflagen ausgebildet sein.

Die verschieden alten Terrassen, die v.a. im Süden Münchens erhalten sind und Mächtigkeiten von wenigen bis etwa 20 Metern erreichen, unterscheiden sich deutlich voneinander, was geotechnische Auswirkungen hat (Mächtigkeiten, Verwitterungs- und Verfestigungsgrad, Komponenten). Die Terrassenabfolge nach Alter und stratigraphischer Position ist in Abb. 8 dargestellt.

Generell gilt in der weiteren Umgebung von München, dass die Deckenschotter als älteste Terrassen oftmals zu Nagelfluh zementiert sind, aber auch den höchsten Verwitterungsgrad aufweisen (z.B. geologische Orgeln). Die jüngeren Schotter der Hochterrasse und Niederterrasse sind dagegen nur lokal verfestigt. Die jungen spät- und postglazialen Terrassen sind nicht verbacken und weisen zudem starke Schwankungen der Lagerungsdichten auf. Die Zementation (Lithifikation) von Schottern und die damit verbundene Umwandlung eines Locker- in ein Festgestein beruht auf unterschiedlichen chemischen und physikalischen Prozessen. Aufgrund der Bedeutung der Lithifikation von Schottern für die Stabilität der Hänge werden in Kapitel 5.3 die Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren ausführlich beschrieben. Das Geröllspektrum umfasst Sedimentgesteinsmaterial, v.a. Karbonate der nördlichen Alpen. Hohe Kristallingehalte treten nur in der Hochterrasse auf.

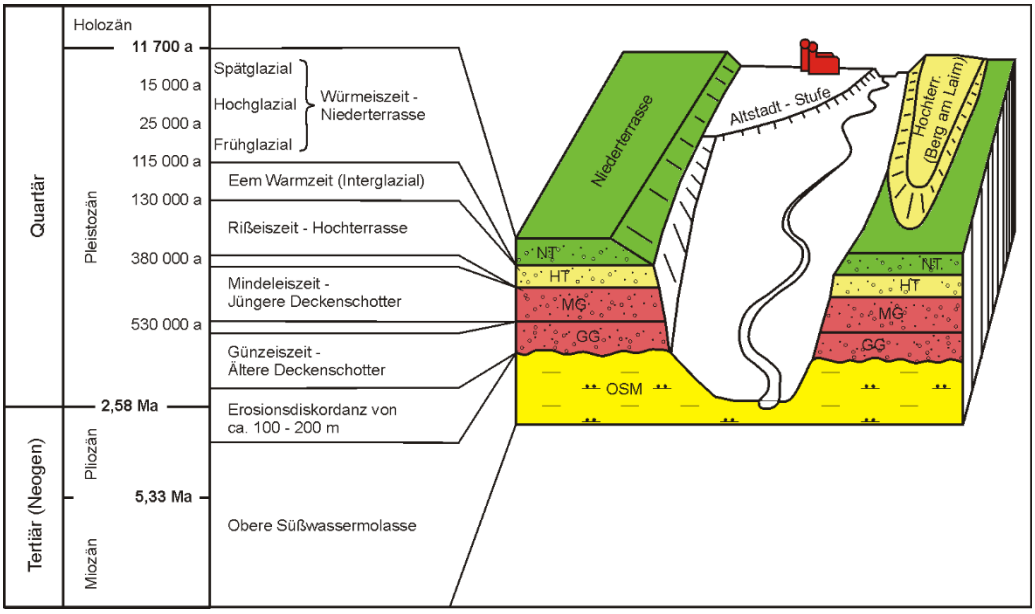


Abb. 8: Stratigraphie des Pullacher Untergrundes mit dem tief eingeschnittenen Isartal und der Verflachung im Stadtgebiet von München (nach Dreesbach 1985 und Meyer & Schmidt-Kaler 1997).

3.4 Holozäne Entwicklung des Pullacher Isartales

Ab dem ausgehenden Spätglazial bildet sich die heutige Isar als mäandrierender Fluss heraus, die heutige Abflussrinne nach München und Freising ist damit sehr jung. Sie schneidet sich bis heute 60-70 m tief in die Terrassen und den Molasseuntergrund südlich von München ein (Abb. 9). Dieser Canyon verflacht nach Norden und erweitert sich im Stadtbereich trompetenförmig. Nördlich Münchens entwickelt sich das Tal in die Breite und mehrere postglaziale Isarterrassen (Auwald-Stufe etc.) können zusätzlich untergliedert werden.

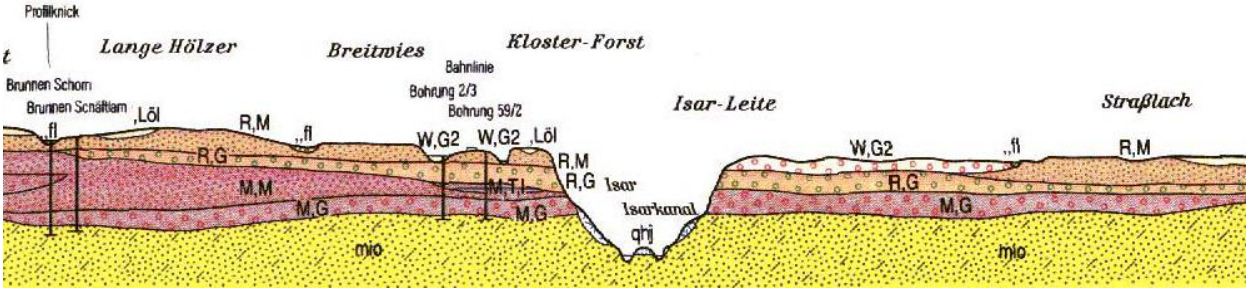


Abb. 9: Profilschnitt durch den Isartal-Canyon südlich von Grünwald / Pullach (Ausschnitt aus der amtlichen geologischen Karte 1:50.000 [U 17]), 5-fach überhöht.

Die junge Geschichte des Isartals im Süden Münchens ist auch mit der Entwicklung des ehemaligen Wolfratshauser Sees verbunden. Nach Rückschmelzen des Eises entstand, von der Isar gespeist, zunächst der damalige Tölzer See und gemeinsam mit der Loisach der

Wolfratshauser See. Am Überlauf des Sees tiefte sich die Isar in die Endmoränen ein und schließlich vor etwa 12000 Jahren - so die gängige Lehrmeinung - lief der See aus und die Erosion des Canyons an heutiger Stelle setzte ein [U 19]. Der vorwürmzeitliche Isarvorläufer floss übrigens weiter östlich Richtung Holzkirchen.

Die Hochuferregionen im Isartal südlich von München, beispielsweise im Bereich der Gemeinden Pullach, Grünwald oder Baierbrunn, sind also geologisch gesehen vergleichsweise jung und haben ihren „natürlichen Böschungswinkel“, eine mehr oder weniger stabile Gleichgewichtssituation der Hangflanken nach langer Zeit der Erosion, noch nicht erreicht. Sie stellen daher seit jeher ein durch Hangbewegungen gefährdetes Gebiet dar.

Die Isar als Motor für die instabilen Hänge unterspült und erodiert die Uferregionen weiterhin. Zudem ist anzunehmen, dass durch die Errichtung des Sylvensteinspeichers zum Hochwasserschutz des Isartals (1954-59) die Tiefenerosion aufgrund mangelnder Geschiebefracht weiter erhöht wurde ([U 25]). Der Bau des Isarwerkkanals mit seinen Dammbauwerken stellt hingegen für das W‘ Hochufer einen gewissen Erosionsschutz dar. Die am Hangfuß lagernden, alten Rutschmassen, welche den instabilen Hängen als Widerlager dienen, werden langsamer oder kaum mehr abgetragen, was zu einer Stabilisierung der Großrutschungen führt. Dennoch muss prinzipiell auch in Zukunft von weiteren (Groß-) Rutschungen und anderen begleitenden Hangbewegungen ausgegangen werden.

4 Abriss der Bearbeitungsgeschichte

Hangrutschungen sind im Isartal südlich Münchens schon spätestens seit dem 17. Jahrhundert im technischen Bewusstsein der betroffenen Gemeinden. So musste auf der rechten Isarseite beispielsweise zwischen 1670 und 1694 wegen einer drohenden Hangrutschung die Grünwalder Burg teilweise abgerissen und umgebaut werden [U 28]. Die letzten Großrutschungen ereigneten sich mit dem sehr gut dokumentierten und untersuchten Rutschungsvorgang der Jahre 1970 bis 1975 ([U 20] [U 21]). Am Pullacher Isarhochufer finden sich ebenfalls zahlreiche große Rutschschollen, die sich auf einige Jahrhunderte bis einige 1000 Jahre einstufen lassen, im Bereich der Grünwalder Brücke auch rezent aktiv und überwacht. Dokumentiert sind v.a. jüngere Ereignisse, die für die Bebauung als kritisch zu betrachten waren, wie der große Nagelfluhabbruch am Burgweg nahe der Burg Schwaneck im Jahr 1962 ([U 43], [U 44], [U 46]).

Im Folgenden wird ein Überblick über ausgewählte geologische Untersuchungen der letzten Jahrzehnte im Gemeindebereich Pullachs gegeben. Dies beinhaltet Baugrunduntersuchungen, wie z.B. für das Bürgerhaus, aber auch Untersuchungen des Hanges, Sanierungsplanungen und wissenschaftliche Bearbeitungen. Erkenntnisse daraus, beispielsweise Daten aus Bohrungen, gehen in die Gesamtbetrachtung dieser Arbeit ein. Grundlagen zu den dokumentierten Hangbewegungen, ihre Klassifizierung und Prozesse wird in Kapitel 6.1 gegeben.

4.1 Burg Schwaneck - Burgweg - Heilmannstraße

Burgweg und Burg Schwaneck

Die ersten Gebäudeteile der Burg Schwaneck wurden um 1843 von Ludwig Schwanthaler erbaut und gründen auf Nagelfluh. Am 11. Juni 1962 ereignete sich ein großer Abbruch dieser Nagelfluh auf etwa 100 m Länge und bis zu einigen Metern Breite unterhalb des Burgwegs SW‘ der Burg. Erste Risse im Boden waren bereits 1860 zu erkennen. Große Sturzblöcke der abgestürzten Deckenschotter-Nagelfluh können heute noch sehr gut studiert werden. Die Erstbegutachtung erfolgte im Auftrag der Gemeinde durch Prof. Schaefer 1962 [U 43], eine weitere schließlich durch Prof. Jelinek [U 44]. Der Burgweg wurde schließlich rückverlegt und eine lokale Sicherung der Nagelfluh im Bereich des Anwesens Burgweg Nr. 2 durch Anker und Spritzbeton eingebracht.

Abb. 10: Foto der Abrisskante der Rutschung am Burgweg 1962. Links der Bungalow von Burgweg 2 (wurde nach dem Ereignis aus Sicherheitsgründen geräumt), rechts ist die Burg Schwaneck zu erkennen. Blickrichtung NE (entnommen aus: Baumann 2010 [U 21]).

Umfangreiche Aufschlussbohrungen im Bereich zwischen der Burg Schwaneck und der Heilmannstraße wurden durch das LfU in den Jahren 1962-64 durchgeführt. Direkt am Hangfuß der Burg Schwaneck wurden erstmals 11 vertikale Bohrungen (PB-1 bis PB-11) bis zu einer Tiefe von max. 15,75 m bis in den tertiären Flinz abgeteuft. Die Bohrungen wurden als Grundwassermessstellen ausgebaut und die Pegelstände kontinuierlich von 1964 bis 2002 gemessen. Des Weiteren wurden Laboruntersuchungen durchgeführt. Weitere Horizontal- und Schrägbohrungen (HB-1+2/SB-1 bis SB-3) folgten mit dem Ziel, die Erstreckung und Beschaffenheit der Nagelfluh zu erkunden.

Eine Begutachtung und Interpretation der Bohrergebnisse sind in dem Gutachten von Müller [U 46] enthalten. Er interpretiert die unterschiedlichen Tiefen der Tertiär-Oberfläche als eine SW-NW streichende Mulde innerhalb der nach Norden ansteigenden Flinzoberfläche. An den Bohrungen selbst wurden optische Sondierungen durchgeführt, die wertvolle Informationen zu Festigkeit, räumlicher Verbreitung und Klüftung der Nagelfluh ergaben. So wird hier beispielsweise belegt, dass die Zementation in den oberflächen-/böschungsnahen Bereichen stärker ausgeprägt ist als landeinwärts.

Auf Grundlage der geodätischen Messungen und visueller Bohrlochsondierungen erkennt Müller im Jahr 1964 eine Dehnung der Hangpartien Richtung Isar und prognostiziert „in naher Zukunft“ ein gleiches Versagen wie im Bereich des Burgweges 1962. Eine überschlägig berechnete, senkrechte Abbruchwand würde eine „latente aber ernste […] Gefahr“ für die Südfront des Gebäudes darstellen. Müller empfiehlt dauerhaft geodätische Messungen des Hanges und eine Ausweitung der Überwachungsmöglichkeiten um eine Extensometermessstelle, die schließlich im Jahr 1989 installiert wurde.

An der Hangkante, nordöstlich der Burg Schwaneck, wurden 1972 11 Leichte Rammsondierungen durchgeführt (DPL Hangkante 1-5). Eine weitere Schrägbohrung (SB-4) wurde 1989 am Hangfuß abgeteuft und mit einem, wie von Müller 1964 gefordert, Stangenextensometer ausgebaut, das seitdem kontinuierlich die Dehnungsraten in drei Tiefenniveaus (15, 26 und 35 m) des Steilhanges überwacht (Kapitel 6.3.1). Oberflächlich wurde die Beschaffenheit des Untergrundes bis zur Tertiäroberfläche mittels drei Leichter Rammsonden (DPL Hangfuß 1-3) bis in eine Tiefe von max. 10,9 m erkundet.

Tab. 4: Ergebnisse der Leichten Rammsondierungen im Bereich der Burg Schwaneck an der Hangkante (1972) DPL-5 und am Hangfuß (1989) DPL-10. (Quelle: Datenbestand des LfU).

Aufschluss-bezeichnung	Ansatzhöhe [m ü. NN]	Endteufe [m u. GOK]	Bewertung der Lagerungsdichte / Konsístenz
DPL Hochufer 1	576,0	1,6	locker bis mitteldicht gelagertes Material (Auffüllung?) bis 1,3 m u.GOK, anschl. dichte Lagerung
DPL Hochufer 2	576,0	1,6	locker bis mitteldicht gelagertes Material (Auffüllung?) bis 1,2 m u.GOK, anschl. dichte Lagerung
DPL Hochufer 3	575,7	3,3	locker bis mitteldicht gelagertes Material (Auffüllung?) bis 3,2 m u.GOK, anschl. dichte Lagerung
DPL Hochufer 4	575,5	2,9	locker bis mitteldicht gelagertes Material (Auffüllung?) bis 2,8 m u.GOK, anschl. dichte Lagerung
DPL Hochufer 5	574,0	1,3	locker bis mitteldicht gelagertes Material (Auffüllung?) bis 1,1 m u.GOK, anschl. Dichte Lagerung
DPL Hangfuß 1	539,5	10,5	lockere Lagerung bis ca. 7,5 m u.GOK, Tertiäroberfläche ca. bei 530 m ü.NN
DPL Hangfuß 2	540,5	10,9	lockere Lagerung bis ca. 8,3 m u.GOK, Tertiäroberfläche ca. bei 531 m ü.NN
DPL Hangfuß 3	540,0	9,6	lockere Lagerung bis ca. 8,2 m u.GOK, Tertiäroberfläche ca. bei 531 m ü.NN

Tab. 5: Beschreibung der in den Jahren 1962/63 abgeteuften Pegelbohrungen (PB) sowie der 1964/89 abgeteuften Horizontal- und Schrägbohrungen (HB/SB) am Hangfuß im Bereich der Burg Schwaneck. (Quelle: Datenbestand des LfU).

Bohrungs-bezeichn.	Ansatzhöhe GOK [m ü. NN]	Teufe [m]	Gauss-Krüger-Koord. Rechtswert	Gauss-Krüger-Koord. Hochwert	Grund-wasser [m ü. NN]	Geologische Erkenntnisse
PB-1	544	13,60	4.465.114	5.324.635	535,5	Nagelfluhbänke untergeordnet in fest gelagertem Kies ab 10 m u. GOK, Tertiäroberfläche bei ca. 531 m ü.NN
PB-2	543	15,75	4.465.135	5.324.623	535,3	Nagelfluh anstehend bei 0,6-5,3 m sowie 11,8-12,6 m u. GOK, locker bis fest gelagerter Kies zwischengeschaltet, Tertiäroberfläche bei ca. 528 m ü.NN
PB-3	543	10,60	4.465.116	5.324.599	534,9	Quartäre Schotterablagerungen (locker bis fest gelagert) bis zur Teritäroberfläche bei ca. 533 m ü.NN
PB-4	543	10,50	4.465.085	5.324.598	535,3	Quartäre Schotterablagerungen (fest gelagert) bis zur Teritäroberfläche bei ca. 533 m ü.NN
PB-5	545	12,50	4.465.079	5.324.623	535,4	Nagelfluh anstehend bei 8,3-9,6 m u. GOK, Tertiäroberfläche bei ca. 533 m ü.NN
PB-6	540	12,00	4.465.055	5.324.609	534,7	Quartäre Schotterablagerungen (locker bis fest gelagert) bis zur Tertiäroberfläche bei ca. 529 m ü.NN
PB-7	538	9,50	4.465.050	5.324.582	k.a.	Quartäre Schotterablagerungen (locker bis fest gelagert) bis zur Tertiäroberfläche bei 529 m ü.NN
PB-8	537	8,30	4.465.012	5.324.590	533,1	Quartäre Schotterablagerungen (locker bis sehr fest gelagert) bis zur Tertiäroberfläche bei 529 m ü.NN
PB-9	537	7,00	4.464.989	5.324.589	533,5	Quartäre Schotterablagerungen (locker bis fest gelagert) bis zur Tertiäroberfläche bei 531 m ü.NN
PB-10	537	11,20	4.464.997	5.324.570	533,1	Quartäre Schotterablagerungen (locker bis sehr fest gelagert) bis zur Tertiäroberfläche bei 526 m ü.NN
PB-11	538	10,30	4.465.018	5.324.576	531,4	Quartäre Schotterablagerungen (fest gelagert) bis zur Tertiärober-fläche bei 528 m ü.NN
			Bohrlänge [m]	**Neigung** [°]		Kein GW angetroffen
HB-1	554	-	40	0		Nagelfluh mit bis zu mehrere Meter mächtigen Kies- und Sandeinschaltungen (Kies- und Sandlage zw. 2-5 m von Hangkante!). NF teilw. stark geklüftet
HB-2	552	-	20	0		Nagelfluh (hangnah entfestigt) bis 11,5 m von Hangkante, anschl. bis 20,0 m Kies (mittelfest gelagert)
SB-1	554	ca. 16,1	25	40		Oberflächlich (bis 1,0 m) Nagelfluh, anschl. bis 16,1 m Kies (mitteldicht gelagert)
SB-2	552	ca. 17,4	27	40		Oberflächlich (bis 1,0 m) Nagelfluh, anschl. folgt eine Kies-Sand Wechsellagerung (mitteldicht gelagert) bis zur Tertiäroberfläche bei ca. 539 m ü.NN
SB-3	551	ca. 16,4	17	75		Nach einer 1,5 m mächtigen Hangschuttlage folgt Kies (mitteldicht gelagert) bis zur Tertiäroberfläche bei ca. 543 m ü.NN
SB-4	554	ca. 27,6	35	52		Nach einer 4,5 m mächtigen Hangschuttlage folgt schluffiger Kies (mitteldicht gelagert) bis zur Tertiäroberfläche bei ca. 546 m ü.NN; **Ausbau mit Stangenextensometer**

Im Rahmen dieser Studie wurde im Jahr 2014 unterhalb des Burgwegs , im Bereich der 1962 abgebrochenen Nagelfluhblöcke, eine zusätzliche Konvergenzmessstrecke errichtet (Kapitel 5.9).

Heilmannstraße

Für einen Neubau am Grundstück Heilmannstraße Nr. 8 wurde 1996 der Untergrund im Bereich der Hangkante mittels Schwerer Rammsonde (DPH) erkundet. Ab einer Tiefe von max. 0,9 m erreichen die Schlagzahlen N_{10}>4 und bedeuten eine mitteldichte Lagerung, die im weiteren Verlauf schnell in eine dichte bis sehr dichte Lagerung übergeht.

Tab. 6: Ergebnisse der Schweren Rammsondierung an der Hangkante (Heilmannstraße 8) aus dem Jahr 1996, durchgeführt vom Prüfamt für Grundbau, TU München (Quelle: Datenbestand des LfU).

Aufschluss-bezeichnung	Ansatzhöhe [m ü. NN]	Endteufe [m u. GOK]	Bewertung der Lagerungsdichte / Konsístenz
DPH-1 bis DPH-8	581,5	max. 3,2	locker gelagertes Material bis max. 0,9 m u.GOK, mitteldichte Lagerung bis max. 1,3 m u.GOK, anschl. dichte bis sehr dichte Lagerung. Bei Endteufe Schlagzahlen von N_{10}≈60

4.2 Bürgerhaus Pullach

Für den Neubau der Bürgerbräuterrassen bzw. des Bürgerhauses Pullach, fertiggestellt im Frühjahr 1996, wurden im Jahr 1989 drei Kernbohrungen, sieben Schwere Rammsondierungen (DPH) im Hangprofil sowie im Jahr 1992 neun DPH im Bereich des Gebäudes erstellt. Aufgrund des ausreichenden Informationsgehaltes werden nur die Kernbohrungen und die Rammsondierungen im Hangbereich (DPH 1-7) sowie eine repräsentative Sondierung am Gebäude (DPH-8) in diesem Erläuterungsbericht herangezogen.

Abb. 11: Gründungsarbeiten für das 1996 fertiggestellte Bürgerhaus. Rechts sind Werkkanal und Isar zu erkennen. Blickrichtung N (entnommen aus: Baumann 2014 [U 21]).

Tab. 7: Ergebnisse der Schweren Rammsondierungen am Bürgerhaus im Hangbereich (DPH 1-7) und am Gebäude (DPH-8) (Quelle: Datenbestand des LfU).

Aufschluss-bezeichnung	Ansatzhöhe [m ü. NN]	Endteufe [m u. GOK]	Bewertung der Lagerungsdichte / Konsistenz
DPH Bürgerhaus-01	533,7	6,0	locker gelagertes Material bis 0,4 m u.GOK, mitteld. Lagerung bis 1,2 m u.GOK, anschl. dichte bis sehr dichte Lagerung. Zw. 3,5-5,3 m u.GOK nochmals mitteld. Lagerung. Bei Endteufe Schlagzahlen von N_{10}=117.
DPH Bürgerhaus-02	535,6	3,1	locker gelagertes Material bis 2,2 m u.GOK, mitteld. Lagerung bis 2,7 m u.GOK, anschl. dichte bis sehr dichte Lagerung. Bei Endteufe Schlagzahlen von N_{10}=124.
DPH Bürgerhaus-03	540,0	7,8	locker gelagertes Material bis 1,4 m u.GOK, mitteld. Lagerung bis 3,4 m u.GOK, anschl. überwiegend dichte Lagerung bis Endteufe mit Schlagzahlen von N_{10}=102.
DPH Bürgerhaus-04	543,5	8,9	locker gelagertes Material bis 4,2 m u.GOK mit großem Komp. nach 0,4 m u. mitteld. Lagerung zw. 1,9-2,5 m. Ab 4,3 m bis Endteufe (N_{10}=118) dichte bis sehr dichte Lagerung (mit mitteld. Lagerung zw. 5,4-6,4 m).
DPH Bürgerhaus-05	547,0	8,8	locker gelagertes Material bis 3,8 m u.GOK, mitteld. Lagerung bis 5,7 m u.GOK, anschl. dichte bis sehr dichte Lagerung (mitteld. Lage bei 7,3-7,9 m). Bei Endteufe Schlagzahlen von N_{10}=83.
DPH Bürgerhaus-06	549,7	8,9	locker gelagertes Material bis 3,9 m u.GOK mit mitteld. Lage zw. 2,6-3,2 m, mitteld. Lagerung bis 5,5 m u.GOK, anschl. dichte bis sehr dichte Lagerung. Bei Endteufe Schlagzahlen von N_{10}=106.
DPH Bürgerhaus-07	552,5	9,6	locker gelagertes Material bis 1,7 m u.GOK, mitteld. Lagerung bis 6,4 m u.GOK, anschl. dichte bis sehr dichte Lagerung. Bei Endteufe Schlagzahlen von N_{10}=89.
DPH Bürgerhaus-08	581,9	11,3	locker gelagertes Material bis 4,3 m u.GOK, anschl. dichte bis sehr dichte Lagerung bis zur Endteufe mit Schlagzahlen von N_{10}=109.

Von den drei Bohrungen wurde eine im Bereich des Gebäudes (NMB 1) und zwei am Hangfuß (GMB 2, TVB 3) abgeteuft. Die Bezeichnung der Bohrungen gibt bereits einen Hinweis auf deren weitere Nutzung zur Hangüberwachung. Die Bohrung an der Hangkante (NMB 1) wurde zur Neigungsmessung (Inklinometer) ausgebaut, die Bohrungen am Hangfuß (GMB 2 / TVB 3) wurden mit Gleitmikrometer und Trivec-Messsonde ausgestattet. Eine Beurteilung der Bewegungsmessungen des Gleitmikrometers und der Trivec-Sonde von 1989 bis 1998 und der Inklinometermessung zwischen 1996 und 1999 sind in dem Gutachten von Floss ([U 48]) enthalten (Kapitel 6.3.1).

Tab. 8: Ergebnisse der Kernbohrungen am Bürgerhaus im Bereich des Gebäudes (NMB 1) und im Hangbereich (GMB 2, TVB 3) (Quelle: Datenbestand des LfU).

Bohrungs-bezeichnung	Ansatz-höhe GOK [m ü. NN]	Teufe [m]	vertikale Teufe [m]	Grundwasser [m ü. NN]	Geologische Erkenntnisse
NMB 1	582,9	60,0	60,0	542,8	Bis in eine Tiefe von 18 m sind quartäre Schotter mit einer mitteldichten bis dichten Lagerung und teilw. kleinere Nagelfluhbänke anstehend (N_{30}=23-27, mit der Tiefe ansteigend). Darauf folgt eine ca. 3,5 m mächtige Nagelfluhbank, die ab einer Tiefe von 21,5 m wieder von dicht gelagerten, teilw. verbackenen quartären Kiesen unterlagert wird. Die Tertiäroberfläche wird bei 535 m ü. NN angetroffen. Es folgt eine Schluff-Ton (mit Harnischen)-Schluff Wechselfolge, bevor nach 56 m glimmerhaltiger Sand ansteht.
GMB 2	536,3	40,0	22,4	534,6	Bis zur Tertiäroberfläche in einer Tiefe von 2,3 m (534,0 m ü.NN) steht mitteld. gelagerter Kies an. Das Tertiär besteht aus einer Ton-Schluff Wechselfolge mit gelegentlichen Sandlagen. Der Ton ist wie der Schluff teilw. zu Ton-bzw. Schluffstein verfestigt und zeigt Harnischflächen.
TVB 3	535,9	19,0	19,0	534,4	Unter einer mitteld. gelagerten Kiesschicht steht bei 533,2 m ü. NN das Tertiär mit einer Schluff-Ton-Sand Wechselfolge an. Der Sand ist glimmerhaltig und der Ton weist Harnischflächen auf.

4.3 Kirchplatz

Während des Starkregenereignisses im Mai 2013 kam die Hangschutt-/Oberbodenauflage unterhalb der Terrasse des Rabenwirt-Gebäudes am Kirchplatz 1 ins Rutschen. Die Abrisskante mit einer Länge von ca. 30 m reicht teilweise bi an das Fundament des Gebäudes. Das Lockermaterial des großen Hanganbruches wurde ca. 15 bis 20 m hangabwärts transportiert, wobei es den dort verlaufenden Fußweg zur Isar teilweise zerstörte und kamen noch im Steilhang zum Liegen. Ein Gutachten durch die BBB basierend auf einer geologischen Detailaufnahme liegt vor [U 12].

Abb. 12: Rutschung am Kirchplatz 1 von 2013 [U 12]. Die grünen Punkte in der Geologischen Karte (links) stellen die Messfixpunkte der Konvergenzmessstrecken 2-Rabenwirt und 3-Rabenwirt dar. Das Foto zeigt die Rutsch- bzw. Transportfläche, die Abrisskante ist durch die Vegetation am Geländer verdeckt. Blickrichtung Nord.

4.4 Habenschadenstraße - Treppenweg - Kalkofenweg

In diesem Abschnitt des Arbeitsgebiets kann eine Reihe an Baugrund-, Sanierungs- und Gefährdungsgutachten von N-S angeführt werden.

Habenschadenstraße 13

Im Zuge eines Streitfalls wurde hier im Jahr eine Bohrung BK1 bis auf 20 m Tiefe sowie einige Rammsondierungen niedergebracht [U 49] (Tab. 9).

Tab. 9: Ergebnisse der Kernbohrung BK-1 und der Schweren Rammsondierungen (DPH1-3) hangseitig des Anwesens Habenschadenstraße 13 ([U 49]).

Sondierungs-bezeichnung	Ansatz-höhe GOK [m ü. NN]	Teufe [m]	Geologische Erkenntnisse
BK 1	581,70	20,0	Bis in eine Tiefe von ca. 10 m werden locker bis mitteldicht gelagerte Kiese beschrieben, darunter treten schwer bis sehr schwer zu bohrende (Meißeln) verbackene Kiese mit harten Konglomerat-Einschaltungen auf
DPH-1-3	581,70	ca. 9	Mitteldichte bis dichte Lagerung des sandig, schluffigen Kieses ab ca. 1 m u GOK, sehr dichte Lagerung ab ca. 8 m u GOK

Habenschadenstraße 15/17

Während des Starkregenereignisses im Mai 2013 kam die Hangschutt-/Oberbodenauflage der Nagelfluh ins Kriechen und führte zu Deformationen in den Gartenterrassen der beiden Grundstücke. Ein ausführliches Gutachten der BBB liegt vor [U 11]. Die Erkundung erfolgte auf

Basis einer Detailkartierung des Hangs sowie mit 5 Handbohrungen (0,2-0,6 m mächtiger Hangschutt über dicht gelagerten Kiesen bzw. schwach lithifiziertem Schotter), welche die oberflächennah anstehende Nagelfluh erschlossen. Des Weiteren wurden 2013 an den Rissen der Gartenterrassen vier Kluftspione (P1-P4) installiert. Das Monitoring wurde bis Ende April 2015 durchgeführt und zeigt innerhalb des Messzeitraumes von 23 Monaten keine bedeutenden Bewegungen (Kapitel 6.3.2). Eine Sanierung mittels Spritzbetonversiegelung und Erdnägeln bis in das Konglomerat wurde im Bereich des Grundstücks Nr. 15 im Frühjahr 2014 durchgeführt.

Treppenweg unterhalb Habenschadenstraße 23-27

Dieser Fußweg war Gegenstand mehrfacher Begutachtungen durch BBB ([U 1] [U 3] [U 9]) und Sanierungen. Ein Großteil der Verbauung (Mauer mit Nischen) stammt vermutlich aus dem Jahr 1982. Rutsch- und Sturzereignisse von aufgelockertem Hangschutt, einzelner gelöster Nagelfluhblöcke sowie Oberboden traten wiederholt auf (2004, 2008 und 2013), meist in Folge starker Regenfälle. Der Hang ist im Detail kartiert, Sanierungen mit Drahtnetzverhängung und Erdnägel wurden zum Beispiel im Herbst 2009 durchgeführt. Im bewachsenen Oberhang wurden zudem neun Handbohrungen durchgeführt, um die Oberkante der dicht gelagerten bzw. schwach gebundenen Schotter zu erkunden (Tab. 10). Am Hangfuß wurde eine Kleinrammbohrung (KRB) bis in 5 m unter GOK zur Erkundung der Hangschuttmächtigkeit abgeteuft. Zur Überwachung von Klüften und Rissen in der Nagelfluh an potentiell sturzbedrohten Felspartien wurden vier Mauerspione installiert, welche zwischen Mai 2005 und Juni 2013 keine bedeutenden Bewegungen aufzeichneten (Kapitel 6.3.2).

Tab. 10: Ergebnisse der Handbohrungen im Oberhang und der KRB am Hangfuß bei Habenschadenstraße 23-27 [U 3].

Bohrungs-bezeichnung	**Ansatz-höhe GOK** [m ü. NN]	**Teufe**	**Geologische Erkenntnisse**
HB 1-HB 9	572,8 bis 581,0	max. 2 m	Sondierungen unterhalb Gebäudeterrassen/Hangkante mit 0,5-1,4 m mächtigem Hangschutt (U, s, g, schwach organisch) auf dichten Kiesen bzw. schwach lithifiziertem Schotter
KRB1	542,5	5 m	Nach einer ca. 0,4 m mächtigen Schicht Mutterboden folgt bis min. 5 m u. GOK Hangschutt mit einem U, s, g* bzw. G, u, s⁻ Aufbau

Johann-Bader-Straße 23/36

Für die Möglichkeit der Regenwasserversickerung im Bereich der Johann-Bader-Straße wurden 2009 zwei Rammkernbohrungen mit je zwei Absinkversuchen durchgeführt (Kapitel 5.4.1) und von BBB hydrologisch-geotechnisch begleitet ([U 14]). Beide Bohrungen ergaben nach einer ca. 2 m mächtigen Auffüllung quartäre Schotter bis in eine Tiefe von ca. 21 m unter GOK. Sie zeigen eine oberflächennahe lockere Lagerung die sich mit der Tiefe zu mitteldicht bis dicht verändert.

Im unteren Bereich der Schotter zeigen sich zudem Konglomeratrelikte, Kalkkonkretionen und Kalkkrusten an den Geröllen. Ab einer Höhe von 565 m über NN steht Nagelfluh, mit einem sehr hohen Verkittungsgrad, bis zur Endteufe in 25 m an.

Habenschadenstraße 29

Für den Neubau eines Doppelhauses wurden 1982 9 Leichte Rammsondierungen (DPL) im hangnahen Bereich bis in eine Tiefe von max. 3,5 m durchgeführt. Sie ergaben ab einer Tiefe von ca. 0,8 bis 2,5 m eine dichte bis sehr dichte Lagerung des quartären Kieskörpers [U 49]. Schurfbeschreibungen zeigen geringe Zementationsspuren in den oberen Metern der Kiese.

Habenschadenstraße 33 (ehem. Becker Anwesen)

An der Habenschadenstraße 33 wurden im Rahmen von Baumaßnahmen über die Jahre hinweg mehrere Sondierungen und Bohrungen am Hochufer und im hangnahen Bereich durchgeführt. Die ersten Untersuchungen fanden 1987 am Hochufer statt, wo zwei Rammkernbohrungen abgeteuft, Bohrlochrammsondierungen (SPT) und Absinkversuche durchgeführt wurden [U 42]. Zudem erkundete das LfU 1991 mittels Leichten Rammsondierungen sowohl die Hangkante als auch den Hangfuß.

Im Jahr 1992 wurden schließlich zwei Schrägbohrungen am Hangfuß durch das LfU durchgeführt und mit Stangenextensometern bestückt. Die kontinuierliche Messung wurde 2013 auf Grund zu geringer Bewegungen eingestellt [U 45] (Kapitel 6.3.1).

Tab. 11: Ergebnisse der Rammkernbohrungen an der Habenschadenstraße 33 im Bereich der Hangkante und am Hangfuß (Quelle: Datenbestand des LfU).

Bohrungs-bezeichnung	Ansatz-höhe GOK [m ü. NN]	Teufe [m]	vertikale Teufe [m]	Geologische Erkenntnisse
B 1 (Hangkante)	585,5	14,0	14,0	Bis zur Endteufe bei 14 m stehen dicht bis sehr dicht gelagerte quartäre Kiese an. Sie zeigen teilw. lokale Verwitterungen sowie verbackene Lagen und dichte bis sehr dichte Lagerung. Ab 13,2 m u. GOK hat der Kies eine so hohe Gesteinsfestigkeit, dass er mittels Meißel gelöst werden muss. Es wurde kein Grundwasser erbohrt.
B 2 (Hangkante)	585,9	14,0	14,0	
B 1 (Hangfuß)	547,5	41,1	29,1	ca. 45° hangeinwärts geneigte Schrägbohrung mit Stangenextensometer, bis ca. 2 m u. GOK Kies (G, s, u) anstehend, anschl. Tertiär (545 m ü. NN) mit schluffiger (U, t, s) bis teilw. sandiger (S, u$^-$) Zusammensetzung mit vereinzelten schwachen Kalkkonkretionen
B 2 (Hangfuß)	548,0	42,0	29,7	ca. 45° hangeinwärts geneigte Schrägbohrung mit Stangenextensometer, bis ca. 8,5 m u. GOK Kies (G, s, u*) erbohrt, Tertiär (ab 536 m ü. NN) als Schluff mit schwach – bis stark tonigen und sandigen Nebengemenganteilen, teilw. Kalkkontretionen

4.5 Brückenweg

Für die Planung der Erneuerung des Brückenwegs im Norden der Grünwalder Brücke wurden im Jahr 2011 zwölf Handbohrungen sowie vier Schwere Rammsondierungen durchgeführt [U 6]. Diese Erkundungsmaßnahmen liegen im Bereich der oberen Abrisskante der Großrutschung (Handbohrungen) und in den Nackentälchen der kleineren Rutschschollen (Nr. 22-24) (DPH).

Tab. 12: Ergebnisse der Handbohrungen im Oberhang am Brückenweg sowie der Schweren Rammsondierungen am Hangfuß [U 6].

Bohrungs-bezeichnung	Teufe	Geologische Erkenntnisse
HB 1 bis -12	bis >2 m	Sondierungen im Oberhang mit geringmächtigem Verwitterungsschutt auf dicht gelagertem (evtl. geringfügig verfestigten) Schotter
DPH-1 bis -4	bis 6 m	überwiegend mitteldichte bis teilw. lockere Lagerung der Schotter bis in 6 m Tiefe sondiert, im Bereich von DPH-4 harte (evtl. leicht zementierte) Lage in ca. 2,7 m Tiefe (~561 m ü. NN)

4.6 Grünwalder Brücke

Der westliche Isaruferabschnitt vom Kalkofenweg bis zur Grünwalderbrücke ist geprägt von einer „Rutschschollen-Morphologie“, das Ergebnis seit Jahrtausenden ablaufender Großrutschungen. Diese sind bereichsweise aktiv, wie auch auf der Grünwalder Seite in den Jahren 1970 und 1975 aufgetretene Großereignisse zeigten (z.B. [U 24] [U 28]). Im Fall der Pullacher Seite kam es beispielsweise 1942 zu einer sekundären Rutschung an einer älteren Rutschscholle und zur Zerstörung einer Wasserleitung nahe dem Jaiserbrünnerl. Ein großer und aktiver sowie detailliert vom LfU untersuchter Rutschbereich tritt im Bereich der Grünwalder Brücke auf. Hier sind für den Neubau der Grünwalder Brücke in den Jahren 1998 bis 2000 entsprechende Bohraufschlüsse hergestellt sowie Messeinrichtungen installiert worden. Detaillierte Ausführungen werden in bestehenden Unterlagen und Publikationen gegeben (z.B. [U 21] [U 22] [U 24]). Die folgenden Abbildungen zeigen repräsentativ einen Lageplan mit Erkundungspunkten sowie geologisch-geotechnische Schnitte zur Interpretation der in beiden Uferbereichen ablaufenden Hangbewegungen. Detaillierte Beschreibungen finden sich i.W. bei Baumann (z.B. [U 24] [U 20] [U 21] [U 22]).

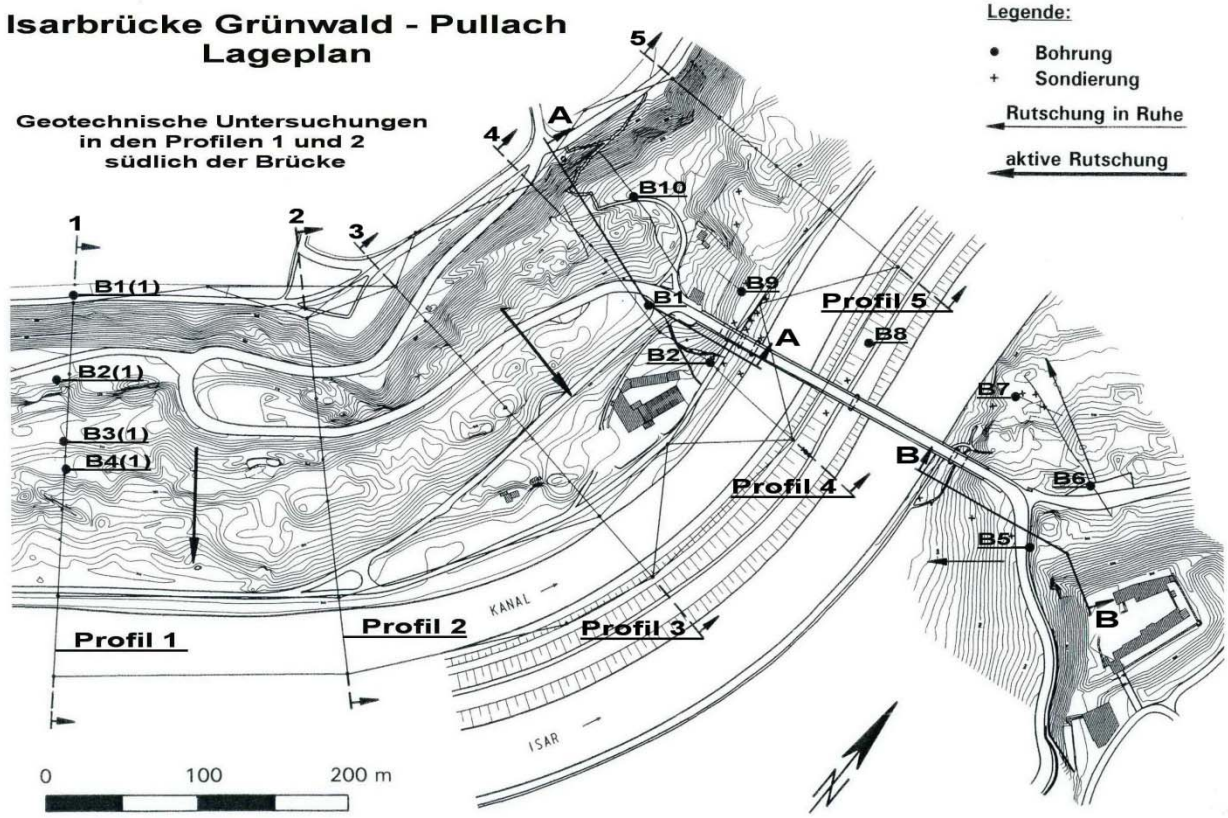


Abb. 13: Überblick über die Erkundung im Widerlagerbereich der Grünwalder Brücke (entnommen aus: Baumann 2014 [U 21]).

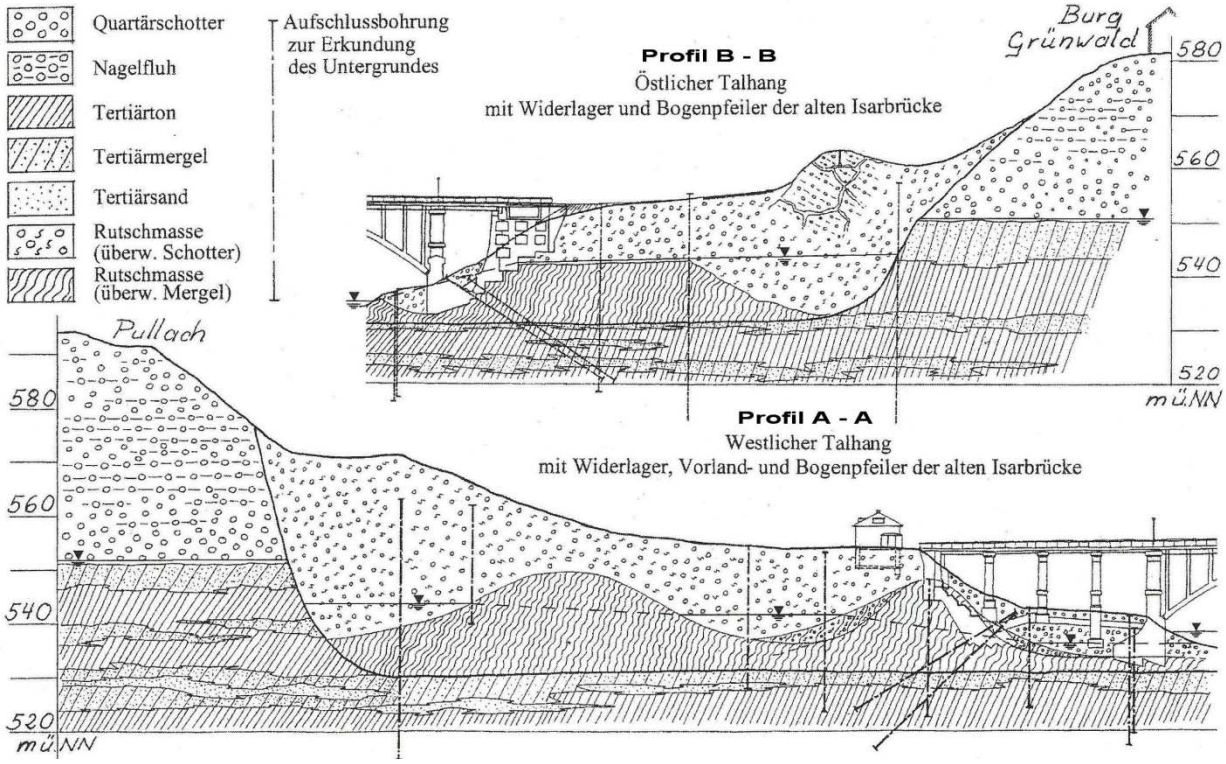


Abb. 14: Geologisch-geotechnische Profile mit Darstellung der alten Grünwalder Brücke (entnommen aus: Baumann 2014 [U 21]).

4.7 Wissenschaftliche Arbeiten

Neben den oben erwähnten gutachterlichen Stellungnahmen wurden auch wissenschaftliche Bearbeitungen im Rahmen von Bachelor- und Master-Arbeiten bis hin zu Promotionen im weiteren Projektgebiet durchgeführt. Zu nennen sind hier Baumann (1988) [U 20], Biersack 2008 [U 28], Scherzer 2009 [U 29], Starace 2009 [U 30] und Steinsdörfer 2009 [U 31].

Die folgende Abbildung zeigt die Kartiergebiete der Studienabschlussarbeiten der Jahre 2008 bis 2009 des Lehrstuhls für Ingenieurgeologie der TU München.

Abb. 15: Überblick der wissenschaftlichen Bearbeitung durch Studienabschluss-arbeiten am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU München.

5 Ingenieurgeologische Bestandsaufnahme

5.1 Geologischer Abriss des Bearbeitungsgebietes

Das Bearbeitungsgebiet kann zunächst geologisch-morphologisch in einen steilen oberen Hangbereich des Hochufers, bestehend aus pleistozäner Nagelfluh und/oder dicht gelagerten Schotterterrassen, sowie den flacheren Unterhang gegliedert werden. Letzterer besteht aus Hangschutt, Sturzmaterial sowie großen tiefreichenden Rutschschollen. In einigen Anschnitten treten im Unterhang Aufschlüsse des basalen, die Schotterterrassen unterlagernden, Flinz auf. Der Unterhang wiederum zeigt eine deutliche Zweiteilung: ein morphologisch unruhiges Rutschschollengebiet mit einem natürlichen Ablagerungsbereich, bestehend aus großen Rutschkörpern mit teilweise aktiven sekundären Rutschungen an den talseitigen Flanken und bis zu >100 m³ großen Sturzblöcken. Zweitens einen durch den Bau des Isarkraftwerks und des Isarwerkkanals stark anthropogen überprägten Unterhang, wo lediglich Sturzmaterial (<10 m³) von den sich im Grenzgleichgewicht befindenden, sich über die Jahre rückverlagernden Isarhängen zeugt. Dieser stark anthropogen überprägte Unterhang befindet sich im Bereich des Ortsteils Pullach zwischen Burgweg und Kalkofenweg.

Das Isarhochufer wird von eiszeitlicher Nagelfluh (mit calcitischem Bindemittel verkitteter Schotter) und Schottern aufgebaut. Es handelt sich dabei um Schmelzwasserablagerungen der jüngeren Kaltzeiten. Diese bestehen aus Steinen und Kiesen unterschiedlicher Körnung und sandigen Einschaltungen. Oft sind die weitgestuften Ablagerungen durch calcitischen Zement gut verbacken und werden als Nagelfluh bezeichnet (siehe Kapitel 5.3). Sie können aber auch mehr oder weniger unverfestigt vorliegen oder sekundär durch Verwitterungsprozesse wieder entfestigt sein. Es treten massige, gebankte und schräggeschichtete Ablagerungsgefüge der Schmelzwasserschotter auf. Die Gerölle bestehen hauptsächlich aus Kalksteinen, bereichsweise treten auch Dolomite und Kristallingesteine auf. Quartärstratigraphisch handelt es sich bei den im Projektgebiet vorkommenden Ablagerungen um die Deckenschotter (Mindel- und Günzkaltzeit) und die Terrassenschotter (Riß- und Würmkaltzeit). Ober- und Unterhang sind zum Großteil von Wald eingenommen. Im Steilhang jedoch tritt oftmals Nagelfluh-Fels aus der Vegetation hervor. Es handelt sich um bis zu mehrere Meter hohe Felsnasen und senkrechte Felswände von wenigen bis maximal 8-10 m Höhe. Diese werden von Konglomeraten (Nagelfluh) unterschiedlichen Verfestigungs- und Verwitterungsgrades aufgebaut. Viele der Felsbereiche wurden in dieser und früheren Bearbeitungen im Detail kartiert [U 5] [U 12].

Über den Terrassenschottern hat sich eine verschieden mächtige Schwarte aus Verwitterungsmaterial gebildet. Durch die Erkundungsmaßnahmen konnte festgestellt werden, dass die Decke an der Hangkante des Isarhochufers zwischen 0,5 und 1,4 m mächtig ist. Sie besteht hauptsächlich aus den Verwitterungsprodukten des Terrassenschotters mit Oberboden

sowie anthropogen abgelagertem Material (Gartenabfälle und manchmal auch Müll). Insgesamt ist das Material als stark kiesiger, sandiger Schluff mit weicher bis steifer Konsistenz anzusprechen.

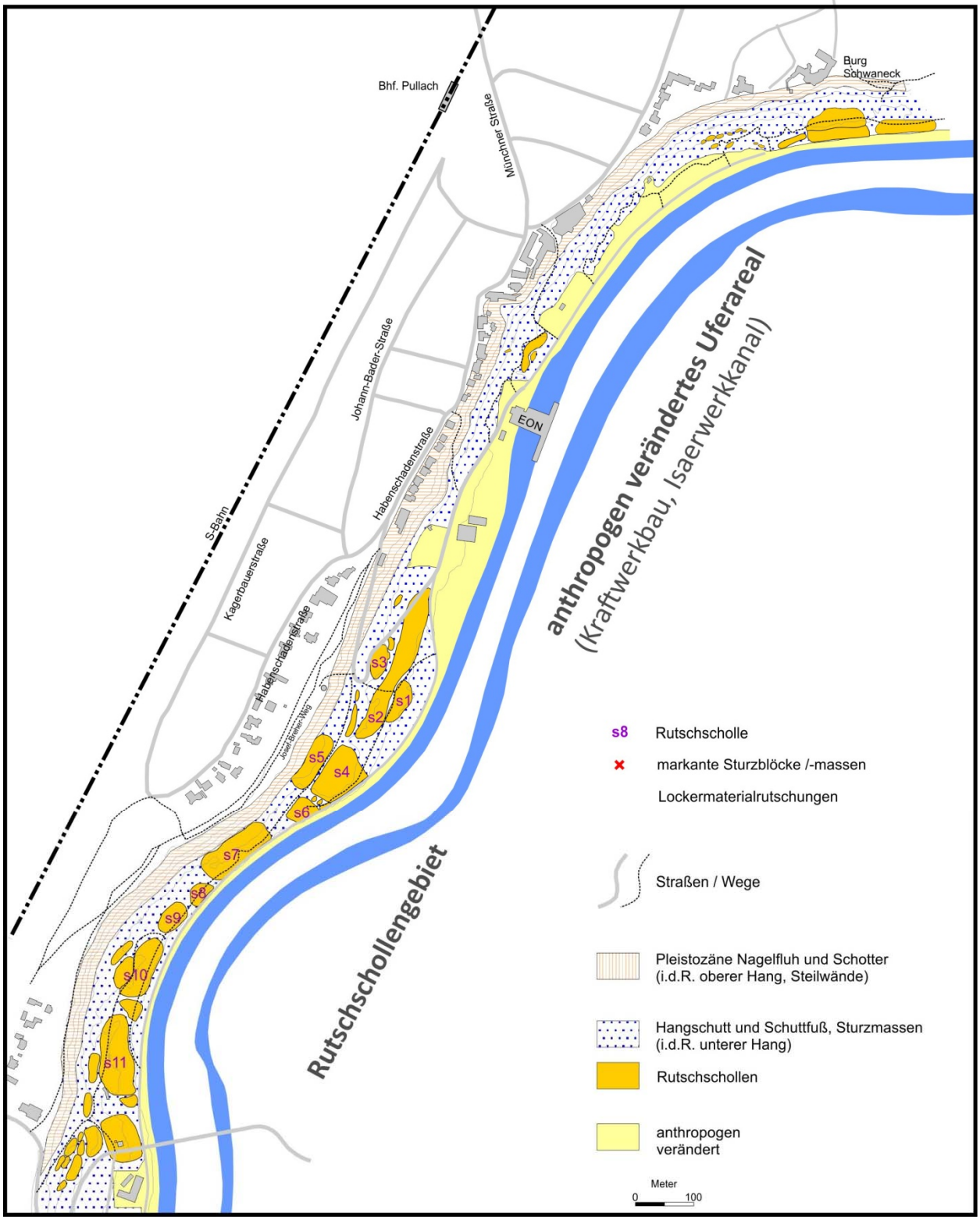


Abb. 16: Vereinfachte geologisch-morphologische Übersicht des Isarhochufers im Gemeindebereich Pullach.

Am Hangfuß des Isarhochufers hat sich mächtiger Hangschutt angesammelt. Es handelt sich dabei hauptsächlich um nachgebrochenes bzw. nachgerutschtes Material aus dem Steilufer und damit um Kies, Sand und Nagelfluhbruchstücke (z.B. Sturzmaterial) sowie Material aus der Deckschwarte. Das Gestein ist als sandiger, schluffiger Kies anzusprechen und wurde 2008 in KRB-1 mit einer Mindestmächtigkeit von 5 m erkundet. Am Hangfuß im Bereich der Burg Schwaneck ergaben die Pegelbohrungen eine maximale Mächtigkeit der Kiese, mit vereinzelten Konglomerat-Einschaltungen, von 15 m bevor die neogenen Feinsedimente erbohrt wurden (Tab. 5).

Der die quartären Sedimente unterlagernde neogene Flinz ist nur selten an der Geländeoberfläche aufgeschlossen (Tab. 13), die detailliertesten Beschreibungen stammen aus Bohrdaten.

5.2 Geologisch-geotechnische Stratigraphie

Folgende Gesteinstypen können im Quartär und Neogen beschrieben werden. In der geologischen Karte werden aus Maßstabsgründen Generalisierungen getroffen, die hier erläutert werden.

5.2.1 Flinz (Obere Süßwassermolasse)

Aufschlüsse im Flinz sind nur wenige vorhanden, da die Quartär-Neogen-Grenze entweder deutlich unter der GOK liegt (z.B. Burg Schwaneck) oder durch Hangschutt überdeckt ist und lediglich hangparallel verlaufende Schichtquellen einen indirekten Hinweis darauf geben (z.B. unterhalb des Bürgerhauses). In Tab. 13 sind die wenigen Aufschlüsse des Neogen (Tertiär) an der GOK zusammengefasst und kurz beschrieben.

Tab. 13: Zusammenfassung der Flinz-Aufschlüsse im Projektgebiet.

Ort	Koordinaten (Gauss – Krüger)		Kurzcharakterisierung
	Rechtswert	Hochwert	
S‘ Burgweg 2	4.464.968	5.324.569	Durch eine alte Abrisskante ist Flinz freigelegt worden, kleiner Quellaustritt vorhanden
SW‘ Sturzmassen von 1962	4.464.884	5.324.545	An N‘ Böschung der schmalen Senke mit mehreren Nassstellen befindet sich ein kleiner Flinz-Aufschluss
ca. 100 m NE‘ Bürgerhaus	4.464.777	5.324.475	ca. 0,7x4 m großer Aufschluss, von Hangschutt überlagert und durch austretendes Wasser gering mit Kalksinter überzogen
talseitig am Fußweg von Rutschsch. Nr. 12	4.464.119	5.323.365	Zwischen den sekundären Rutschschollen von 1942
ca. 120 m NW‘ Grünwalder Brücke	4.463.913	5.322.930	Vermutlich für den Bau der alten Grünwalder Brücke wurde eine Konglomerat-Rutschscholle abgebaut, sodass an der heutigen Sohle Flinz anstehend ist

Weitaus mehr Informationen über die Neogen-Quartär-Grenze und die Lithologie des Neogen liefern die über das gesamte Projektgebiet verteilten Bohraufschlüsse. In Anlage 3 sind die Koordinaten und Tiefenniveaus von Bohrungen aufgelistet, welche den Flinz durchteuft haben. Bei Großrutschungen, die bis in das Tertiär reichen, wird Flinz mit aufgearbeitet und kann talseitig von Rutschschollen in einer Art Melange mit Hangschutt vorkommen.

Eine Beschreibung der charakteristischen Ausbildung des Flinz wurde bereits in Kap. 3.2 gegeben. Zusammenfassend kann angemerkt werden, dass es sich charakteristischer Weise in Pullach um feinkörnige und überkonsolidierte Böden handelt, die aufgrund ihres Glimmergehalts erkennbar und von jüngeren Ton-Schluffböden unterscheidbar sind.

Abb. 17: Flinz-Aufschluss (RW: 4.464.777, HW: 5.324.475) in stark humoser Hangschuttbedeckung, die Quartär-Neogen-Grenze ist nicht aufgeschlossen. Im rechten Bereich bildet sich aufgrund des austretenden, kalkreichen Wassers ein Kalksinter-Überzug auf dem Moos.

5.2.2 Pleistozäne Terrassen

Die pleistozänen Terrassenschotter umfassen verschiedene Böden und Fels, die im Folgenden nach ihrem mechanischen Verhalten zusammengefasst werden.

Nagelfluh: Darunter werden durch calcitisches Bindemittel zu Konglomerat verfestigte Schotter verstanden. Eine ausführliche Beschreibung der Zementation wird in Kapitel 5.3 gegeben. Die

weitere Untergliederung der Nagelfluh nach verschiedenen Festigkeitsgraden wie in vorangegangenen Gutachten (z.B. [U 2], [U 3]) ist im Rahmen der hier ausgeführten Kartierung nicht möglich. Die Nagelfluh ist gebankt bis massig und zeichnet sich bei einer starken Zementation durch hohe Festigkeiten und hohe Verwitterungsresistenz aus (Abb. 21). Ist die Zementation nur unvollständig, hat das Konglomerat nur geringe Festigkeiten, die lagenweise stark schwanken können (sehr mürb, mürb bis mäßig hart). Rollkieslagen innerhalb der Schotterkörper können an der Oberfläche leichter erodieren und bilden häufig Überhänge aus. Unter Verwitterungseinfluss kann das Konglomerat oberflächlich abgrusen oder sich komplett entfestigen und wieder in seine ursprünglichen Gerölle zersetzen.

Schotter: Hierbei handelt es sich um Lockergesteine. Sie sind meist stark sandig und schluffig, können aber auch feinanteilsarm sein und sich „rollig“ verhalten. Spuren von Zementation/Verbackung treten nicht oder nur sehr untergeordnet auf. Die Lagerungsdichten sind i.d.R. hoch (Abb. 18).

Sande: Selten treten hellbraune Fein- bis Grobsande als Linsen und Lagen innerhalb der Schotter und der Nagelfluh auf. Diese können als Lockergestein vorliegen, aber auch zu Sandstein verfestigt sein.

Abb. 18: Deckenschotter-Aufschluss (links) mit Detailaufnahme (rechts) südlich des ehemaligen Jaiserhauses (RW: 4.464.140, HW: 5.323.419).

5.2.3 Holozäne Bildungen

Verwitterungsdecke: Geringmächtige Lockergesteinsschwarte, die der Nagelfluh und den unverfestigten Terrassenschottern aufliegt. Aus diesem stark kiesigen, sandigen, teilweise

schwach steinigen bis schwach blockigen Schluff besteht u.a. die Rutschmasse vom Frühjahr 2008, die den Treppenweg verschüttet hat.

Hangschutt: Mächtige Ablagerungen am Hangfuß des Isarhochufers. Sie sind als schluffige, sandige, teilweise steinige bis blockige Kiese mit Konglomeratbruchstücken und lokal organischem Anteil anzusprechen (Abb. 19). In jungen Hangschuttbildungen findet sich auch anthropogener Schutt (z.B. Bauschutt, Gartenabfälle). Die Mächtigkeit des Hangschuttes hängt direkt mit der „[…] Art und Menge der am Fuß der Böschung lagernden alten Rutschmassen […]“ [U 24] zusammen, und kann wie schon erwähnt beispielsweise unterhalb der Burg Schwaneck bis 15 m erreichen, lokal auch mehr [U 24].

Tab. 14: Zusammenfassung zu den holozänen Böden und Fels.

Boden- / Felsart	Mächtigkeiten	Quartärstratigraphische Korrelation	Kurzcharakterisierung
Verwitterungsdecke	bis 1,4 m (i.d.R. 0.5 m)	Holozän	stark kiesig-steinige Schluffe mit Oberbodenmaterial, locker/weich-steif
Hangschutt	Dezimeter bis >5m	Holozän	schluffige sandig-steinige Kiese, locker

Abb. 19: Locker gelagerter, kiesig-sandiger Hangschutt unterhalb der Konglomeratwand mit hohem organischen Anteil.

5.2.4 Geologische Einheiten der Kartenblätter 1:1000

Die oben beschriebene Stratigraphie gliedert geotechnische Homogenbereiche (nach DIN 4020) aus, in denen Böden und Felsarten auftreten, die in ihrer Ausbildung (Korngrößen, Schichtung, Klüftung, Härte…) innerhalb gewisser Schwankungsbereiche als homogen anzusehen sind. Dabei handelt es sich also streng genommen nicht um eine klassische Neogen- und Quartär-lithostratigraphische Untergliederung. Diese wird nur soweit übernommen wie sie sich tatsächlich mit geotechnischen Homogenbereichen deckt und auch nachweisbar ist. So sind beispielsweise in den basalen Deckenschottern, die der Nagelfluh unterlagern die Anteile an Mindel- oder Günz-zeitlichen Schottern nicht differenzierbar. Ebenso ist nicht eindeutig klärbar, welche quartärstratigraphischen Terrassenanteile eigentlich zu Nagelfluh verfestigt sind.

Folgende Gliederung der Haupteinheiten wird im Rahmen der geologischen Kartierung durchgeführt und mit klassischer Stratigraphie korreliert. Die Begriffe der Terrassenschotter (Hoch- und Niederterrasse) sowie Deckenschotter sind der Quartärstratigraphie entlehnt.

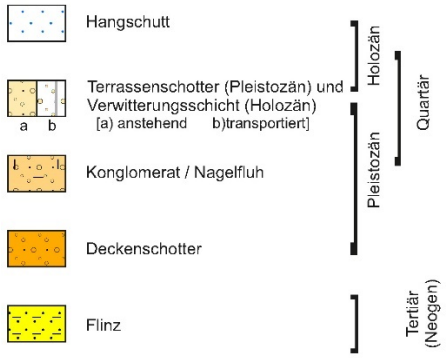


Abb. 20: Ausschnitt der Legende zur geologischen Kartierung mit den Haupteinheiten (geotechnische Homogenbereiche).

5.3 Bedeutung von Zementation und Verwitterung

Die Verfestigung (Lithifizierung) der quartären Schmelzwasserschotter zu Konglomerat ist nach Lempe [U 52] maßgeblich durch Verwitterungsprozesse bestimmt. Durch chemische Verwitterungsprozesse kommt es zu einer Anreicherung des Sicker- und Grundwassers mit Karbonat. Dies wiederum ist Voraussetzung für die Ausfällung von Calcit, was sowohl in der vadosen (wasserungesättigte) wie auch phreatischen (wassergesättigte) Zone geschehen kann. Somit kommt es bei der Verwitterung nicht nur zu Auflockerung und Entfestigung, sondern umgekehrt auch zu lokaler neuer Zementation.

Beiden Prozessen liegt das Kalk-Kohlesäure-Gleichgewicht zugrunde, welches das Verhältnis der Konzentrationen von Calciumkarbonat ($CaCO_3$) und gelöstem Kohlenstoffdioxid (CO_2) beschreibt. Durch Dissoziation von geringen Mengen von CO_2 entstehen des weiteren Kohlensäure (H_2CO_3), Bicarbonat (HCO^{3-}) und Carbonationen (CO_3^{2-}). Wenn sich eine Lösung mit den genannten

Wasserinhaltsstoffen im Gleichgewicht befindet, führt eine Zunahme des CO_2-Gehaltes zu einer Lösung von Karbonat, eine Abnahme des CO_2 zu einer Ausfällung von Karbonat. Diese Änderungen im CO_2-Gehalt werden überwiegend hervorgerufen durch: Eintrag von CO_2 durch Niederschlag, Verdunstung von Wasser, als Produkt von Stoffwechselvorgängen der im Boden lebenden Organismen, die temperatur- und druckabhängige Löslichkeit von CO_2 im Wasser [U 53].

Neben den chemischen Bedingungen gibt es noch strukturelle Eigenschaften des Untergrundes, die für die Ausfällung von Karbonat im Schotterkörper bedeutend sind. Denn die Ausfällung findet bevorzugt in Bereichen mit einem weitgestuften Korngrößenspektrum statt, Lagen mit enggestuften Grobsand oder Rollkieslagen werden zuletzt oder nur gering verfestigt [U 52]. Des Weiteren unterscheidet Lempe zwei Zementationsphasen, welche zur heutigen Erscheinung der Nagelfluh z.B. im Bereich von Pullach führten und führen:

1. Zementationsphase: Sie läuft im geschlossenen Schotterkörper ab und erreicht lediglich eine geringe Festigkeit. In der vadosen Zone bilden sich Gravitationszement (Ausfällung an Unterseite des Gerölls) und Meniskuszement (konkaver Zement zwischen zwei Komponenten). In der phreatischen Zone können sich hingegen Blockzement, Faser- oder Hundezahnzement und Drusenzement bilden.

2. Zementationsphase: Beginnt ab der seitlichen Erosion des Schotterkörpers. In der näheren Umgebung der freigelegten Bereiche kommt es zu einer verstärken Verfestigung durch die Änderung der Druck- und Temperaturverhältnisse und des CO_2-Gehaltes, bedingt durch die erhebliche Abnahme der Mächtigkeit des Grundwasserkörpers im Bereich von Quellaustritten.

Die flächenmäßig größte und auch stärkste Verfestigung der Schotter ist im bayerischen Alpenvorland, wie auch im Bereich von Pullach, in den vorrißzeitlichen Schmelzwasserablagerungen, den sogenannten Deckenschottern zu finden. Ablagerungen der Riß- und Würmkaltzeit sind „[…] meist gar nicht, […] selten rein örtlich auch stärker verfestigt […]“ [U 54]. Nochmals hervorgehoben sei die größere Mächtigkeit der lithifizierten Schotter im Nahbereich von Einschnitten (2. Zementationsphase nach [U 52]). Diese kann, wie im Rahmen der Kartierung dokumentiert, stark schwanken und ist gleichzeitig ein maßgebender Parameter für die natürliche (stabile) Neigung der Hänge sowie auch deren Standsicherheit.

Abb. 21: Überhängende Konglomeratwand ca. 60m nordöstlich des Bürgerhauses mit unterschiedlichem Lithifizierungsgrad. Im vorderen Bereich senkrechte, stark verbackene, im hinteren Teil schwach zementierte Konglomeratwand. Blickrichtung Nordosten.

5.4 Hydrogeologie

5.4.1 Grundwassersituation

Aus hydrogeologischer Sicht enthält der Pullacher Untergrund, wie auch der Großraum München, vereinfacht zwei Grundwasserstockwerke: die quartären Schottern als oberer, homogener Grundwasserleiter (GWL) und die tertiären Sande und Kiese als unterer, differenzierter GWL mit häufig gespannten Grundwasserverhältnissen. Beide GWL sind durch eine mehrere Meter mächtige Mergelschicht, die als Grundwassernichtleiter bzw. –geringleiter fungiert, getrennt [U 25]. Das obere Grundwasserstockwerk ist neben den natürlichen hydrologischen Rahmenbedingungen entscheidend für Grad und Ausmaß der Lithifikation (siehe Kap. 5.3).

Als hydrologische Rahmenbedingungen für Pullach werden ein mittlerer jährlicher Niederschlag von 950 bis 1100 mm/a, eine mittlere jährliche Verdunstung von 300 bis >600 mm/a und eine durchschnittliche Gesamtabflusshöhe von 200 bis 500 mm/a angegeben („Karten zur Wasserwirtschaft 1971-2000“ des LfU). Entscheidend für die Hanganbrüche (Kapitel 6.1.1) sind

v.a. die Starkregenereignisse, die sich mit jährlichen Schwankungen in den Monaten zwischen Mai und August ereignen (Abb. 22).

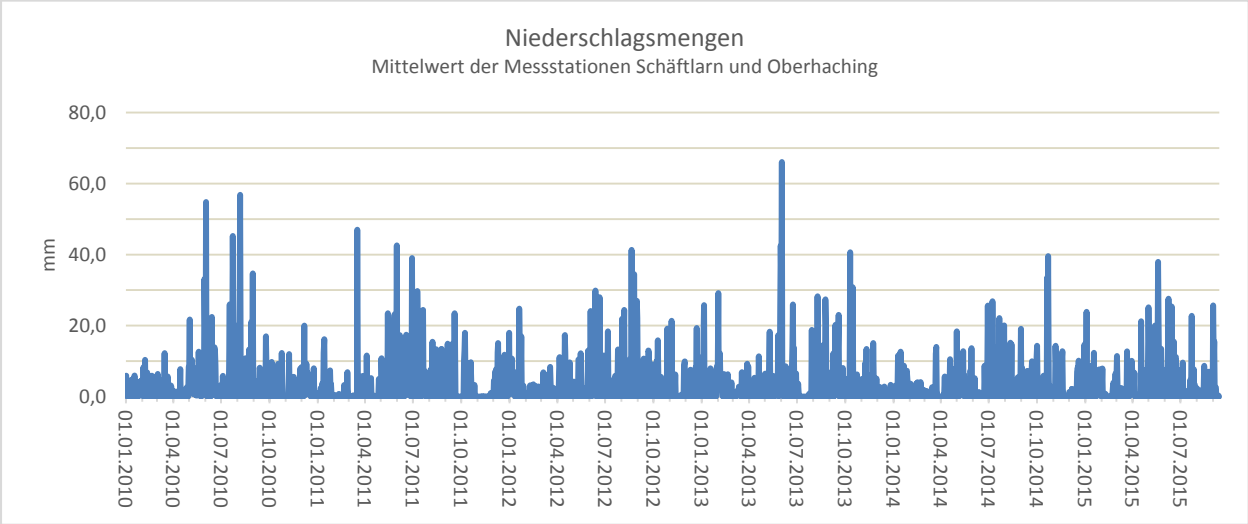


Abb. 22: Niederschlagsmengen (Tageswerte in mm) für die Gemeinde Pullach im Zeitraum Jan. 2010 bis Sept. 2015, gemittelt aus den Wetterstationen Kloster Schäftlarn (557 müNN) und Oberhaching-Laufzorn (604 müNN) [WESTE-XL Daten des DWD].

Im Bereich der Habenschadenstraße 33 wurden im Jahr 1987 zwei Absinkversuche in den vermutlich rißeiszeitlichen Schottern (12 bis 14 m u. GOK) an der Bohrung B1 durchgeführt [U 42]. Dabei lassen sich Durchlässigkeiten von $k_f = 3 \cdot 10^{-3}$ m/s und $k_f = 1{,}3 \cdot 10^{-5}$ m/s ermitteln. Im Jahr 2009 wurden im Bereich der Hauptschule Pullach (Johann-Bader-Straße 23/36) zur Untersuchung der Versickerungsfähigkeit zwei Probebohrungen mit jeweils zwei Absinkversuchen in ähnlichen Tiefenniveaus wie in der Habenschadenstraße 33 durchgeführt [U 14]. Diese ergaben Durchlässigkeitsbeiwerte für die unverfestigten Schotter von $k_f = 3{,}9 \cdot 10^{-3}$ bis $6{,}4 \cdot 10^{-3}$ m/s und das ab ca. 21 m u. GOK anstehende Konglomerat von $k_f = 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ bis $9{,}4 \cdot 10^{-6}$ m/s. In der Literatur sind für die Niederterrassen- sowie Deckenschotter hohe Durchlässigkeiten von $k_f = 10^{-2}$ bis 10^{-3} m/s und für die Sande und Mergel der OSM mäßig bis geringe Durchlässigkeiten von $k_f = 10^{-4}$ bis 10^{-6} m/s angegeben.

An den 1962 abgeteuften Bohrungen am Hangfuß der Burg Schwaneck wurden vom LfU bis in das Jahr 2001 regelmäßig die Grundwasserstände gemessen (Abb. 23). Sie zeigen einen über die Jahre konstanten Grundwasserpegel in Tiefenniveaus zwischen 532 bis 537 m ü. NN. Die „Versprünge“ und „Schwankungen“ sind aufgrund der zum Teil großen Datenlücken von vielen Jahren einerseits sowie starker Unterschiede in der Messfrequenz nur schwer interpretierbar.

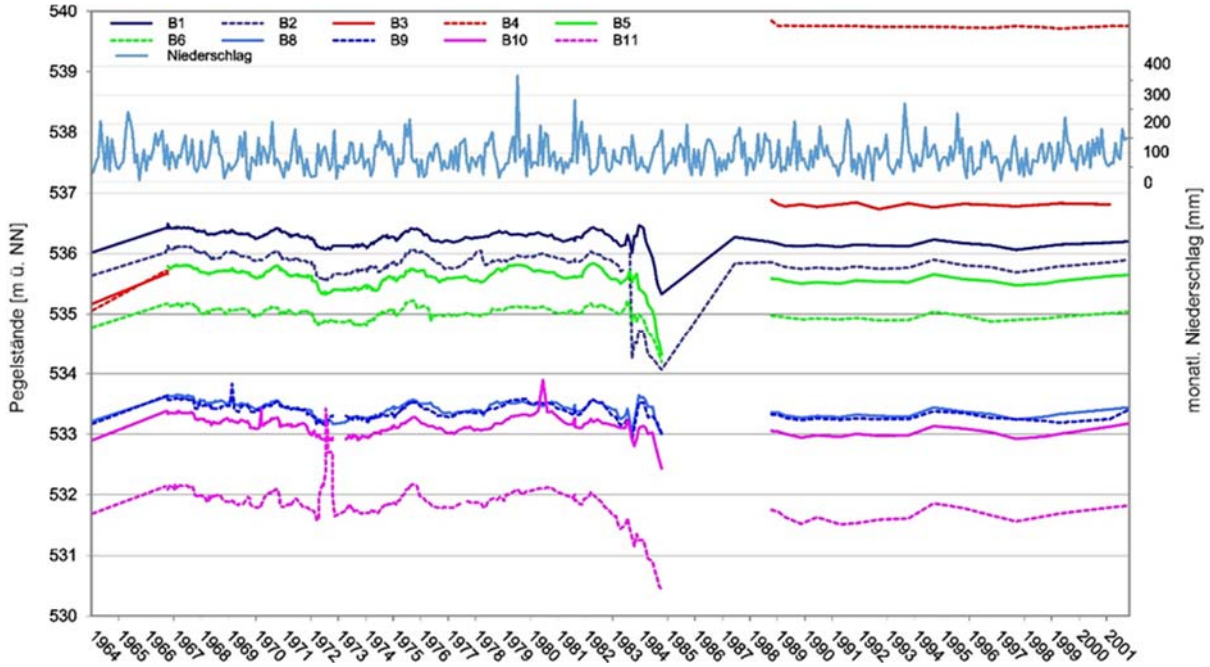


Abb. 23: Grundwasserstände von 10 Pegelbohrungen am Hangfuß unterhalb der Burg Schwaneck zwischen 1964 bis 2001. Zudem sind die monatlichen Niederschlagsmengen dargestellt (Quellen: Pegelstände (Bayerisches Landesamt für Umwelt), Niederschlagsmengen (Deutscher Wetterdienst)).

5.4.2 Brunnen, Pegel, Quellen

Das Grundwasser aus dem oberen Grundwasserstockwerk tritt an zahlreichen Schichtquellen im unteren Bereich der Hänge (ca. 535 bis 540 m ü. NN), oft verdeckt durch den überlagernden Hangschutt, aus. Einige dieser Quellen wurden gefasst, um es als Trinkwasser für die Gemeinde Pullach zu nutzen. Zeugen davon sind die Gebäude unterhalb des Rabenwirtes und S‘ der Heilmannstraße 6, von wo das Trinkwasser weiter nach Baierbrunn in den Hochspeicher geleitet wurde. Seit Mitte der 90er Jahre wird das Trinkwasser aus zwei Tiefbrunnen im Forstenrieder Park gewonnen, wodurch es vor der Entnahme nicht mehr den Untergrund der Gemeinde durchfließt. Das Wasser aus den Schichtquellen wird weiterhin gesammelt und nach Höllriegelskreuth geleitet, wo es als Kühlwasser für die Firma United Initiators GmbH dient. Das erwärmte Kühlwasser wurde über einen künstlichen Wasserfall unterhalb des Brückenweges, ca. 100 m nordöstlich der Grünwalder Brücke, wieder in den Isarwerkkanal zurückgeleitet. Als das Kühlwasser auf anderem Wege abgeleitet wurde, verfiel der künstliche Wasserfall und Teile des Fundamentes sind heute noch im Hangbereich zu finden.

5.5 Historischer Abriss dokumentierter Hangbewegungen

In diesem Kapitel werden die recherchierten Hangbewegungsereignisse, die in irgendeiner Weise dokumentiert sind, also z.B. in Zeitungsartikeln, Gutachten oder durch Augenzeugen,

zusammengefasst. Die Erstellung solcher Chroniken fußt auf den verschiedensten Datierungen und Quellen, wie z.B. auch der folgenden Abbildung eines Ölgemäldes von 1850.

Die hier angefangene Chronik ist nur ein Grundgerüst und bedarf sicherlich Ergänzungen und Aktualisierungen. Dennoch lassen sich erste Erkenntnisse ziehen, die für probabilistische Betrachtungen im Rahmen von Gefährdungs- und Risikoanalysen herangezogen werden. Durch die intensivere Überwachung der Hänge in den letzten 10 bis 15 Jahren durch BBB ergibt sich auch eine genauere Dokumentation kleinvolumiger Ereignisse (Steinschlag, Hanganbruch), die sonst selten dokumentiert sind.

Abb. 24: Isartal bei Pullach und Grünwald mit Blick nach Süden auf Grünwalder Burg vom westlichen Isarhochufer aus. Ölgemälde von H.E. von Zeech 1850 (entnommen aus [U 19]. Die riesigen Nagelfluhblöcke sind bereits entfernt worden. Das Gemälde dokumentiert also ein früheres Großereignis.

Wichtig für die Analyse der Zeitreihen von Ereignissen ist die Differenzierung nach Art und Volumen der Hangbewegungen (Kap. 6.1). Auf dieser Grundlage wurden die seit 1940 dokumentierten Hangbewegungen zusammengefasst (Tab. 15).

Tab. 15: Ergebnisse Vorläufiger Katalog dokumentierter historischer Hangbewegungsereignisse seit dem 20. Jahrhundert).

Versagens-prozess (nach Kapitel 6.1)	Datum	Lokalität (Gauss-Krüger)	Beschreibung
Felssturz oder Rutschung	1908, 1924, 1935	-	Schäfer [U 43] erwähnt diese „größeren Hangabbrüche“ ohne weitere Beschreibung der Prozesse oder des Standortes
sekundäre Rutschung	1942	4.464.108/ 5.323.365	Zerstörung einer betonierten Wasserleitung durch sekundäre Rutschungen talseitig der Rutschscholle Nr. 12 [U 31]
Felssturz	11. Juni 1962	4.464.843/ 5.324.595	Abbruch der Hangkante auf ca. 100 m Länge, 85° steile Abrisskante, Beginn: 1860, erster Abriss: 1935-36 [U 43] [U 44], mündl. Mitt. Herr Deprosse
Großrutschung	ab Okt. 1970	E‘ Hochufer S‘ Gereutstraße	Großvolumige Rutschung mit Bewegungsraten (max. 130 mm/d) über mehrere Jahre hinweg, Aktivierung alter Rutschschollen durch Reduzierung der Seitenstützung, Transport und Aufschiebung von Rutschmaterial bis in das Flussbett hinein [U 24]
Großrutschung	Januar 1975	E‘ Hochufer zw. Gereut- und Klessingstraße	Abbruch eines noch ungebrochenen Hangabschnittes, zusammen mit der andauernden Rutschung von 1970 ergibt sich ein bewegter Abschnitt von insg. ca. 800 m
Hanganbruch	1975	4.464.532/ 5.324.211	Abrutschen einer max. 1 m mächtigen Deckschicht auf ca. 20-25 m Breite oberhalb des anstehenden Nagelfluhs. Die Rutschmassen kommen nach ca. 40 m auf Hangschutt zu liegen. (Quelle: Bayernatlas, Objekt-ID: 793GR015002)
Felssturz	22./23. Jan. 2003	4.463.976/ 5.323.329	Stürzen/Abbrechen eines ca. 60 m³ großen Nagelfluhspornes an der Hochleite, S‘ des Jaiser-brünnerls (mündl. Mitt. Herr Deprosse)
Rutschung	25. Nov. 2003	4.464.459/ 5.324.032	Sturz von ca. 2 m³ Nagelfluh und Abrutschen von lockerem Kies und Erdmaterial auf den Treppenweg [U 1]
Steinschlag/ kleiner Blockschlag	2004/ 2005	4.464.312/ 5.323.739	Sturz von mehreren Nagelfluhblöcken (bis 80 cm Durchmesser) auf den Kalkofenweg [U 2]
großer Hanganbruch	Frühjahr 2008	4.464.459/ 5.324.054	Sturz und Rutschen von mehreren m³ Nagelfluh und Lockermaterial auf den Treppenweg, erste geringere Rutschbewegungen bereits Ende November 2007 [U 3], [U 31]
Hanganbrüche	Mai 2013	4.464.465/ 5.324.026 4.464.468/ 5.323.986	2 Rutschungen von mehreren m³ Lockermaterial auf den Treppenweg [U 9]
Hangkriechen	Mai 2013	4.464.519/ 5.324.178	Deformationen im Terrassenbereich der Habenschadenstraße 15/17 [U 11]
großer Hanganbruch	Mai 2013	4.464.609/ 5.324.340	Rutschung von Lockermaterial am Kirchplatz 1, Abbruchkante halbkreisförmig mit ca. 30 m Länge, Ablagerung auf Fußweg [U 12]
Steinschlag	Mai 2013	4.464.312/ 5.323.739	Kleinvolumige Geröll- und Schuttablagerungen am Kalkofenweg [U 10]

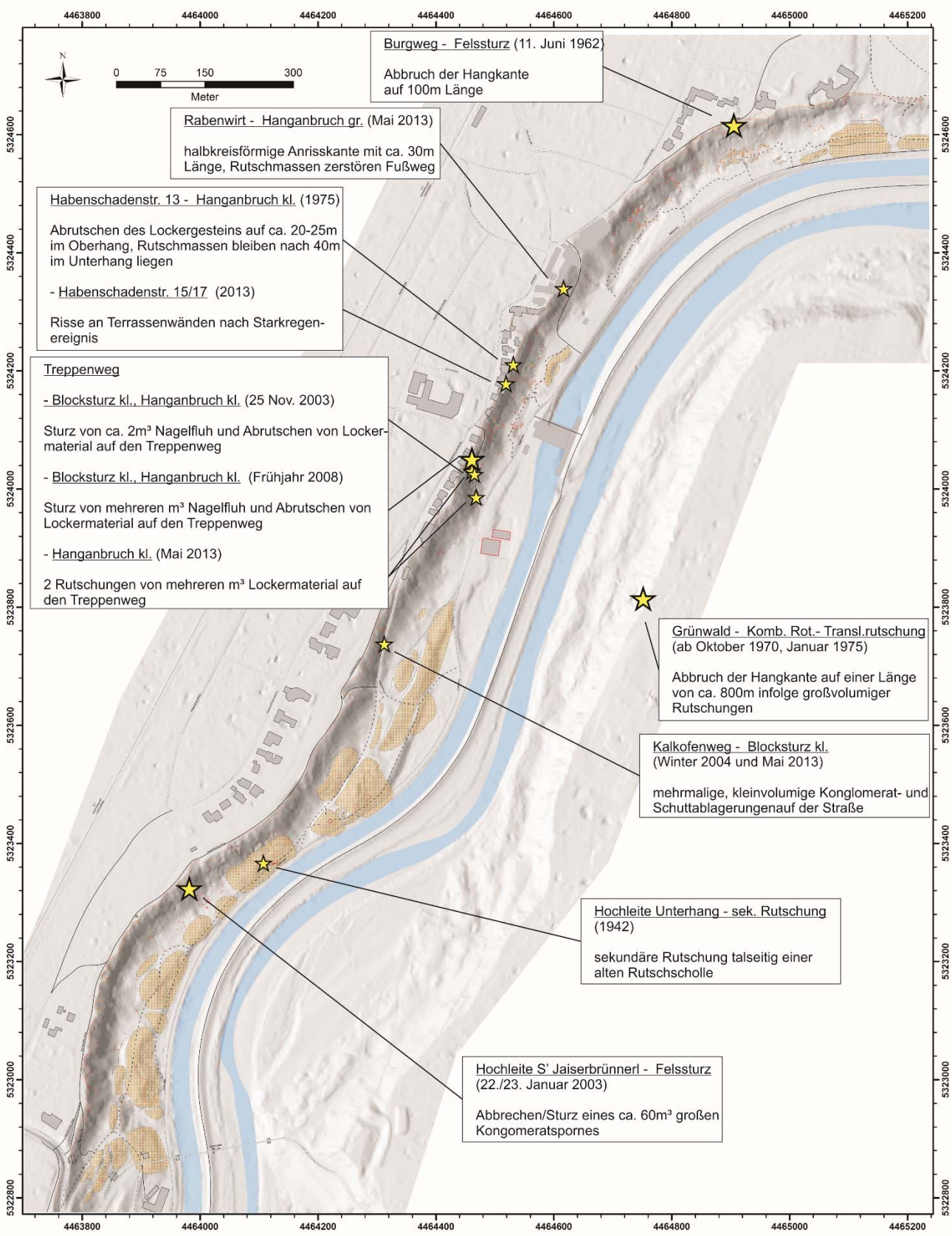


Abb. 25: Übersichtskarte aller dokumentierten Massenbewegungen im Projektgebiet seit 1940, die zeitlich und räumlich zugeordnet werden konnten.

Bei der gewählten Klassifizierung der Massenbewegungen nach Art und Volumen wurde versucht gängige Klassifizierungen wie sie auch vom LfU verwendet werden heranzuziehen. Allerdings sind lokale Abweichungen erforderlich, was in Kapitel 6.1 erläutert wird.

5.6 Anthropogener Einfluss

5.6.1 Bebauung und Nutzung am Isarhochufer

Im nördlichen Abschnitt des Untersuchungsgebietes reicht die zum Teil alte Bebauung bis an die Hangkante, so entlang der gesamten Habenschadenstraße bis zum Burgweg und der Burg Schwaneck. Eine Fahrstraße (Kalkofenweg) sowie mehrere Fußwege (z.B. Treppenweg) führen von der Hangkante in das Tal hinunter.

Abb. 26: Rutschung/Sturz von aufgewittertem Konglomerat und Lockermaterial unterhalb der Habenschadenstraße 17 im Jahr 1995 (Foto zur Verfügung gestellt von Frau Schütze).

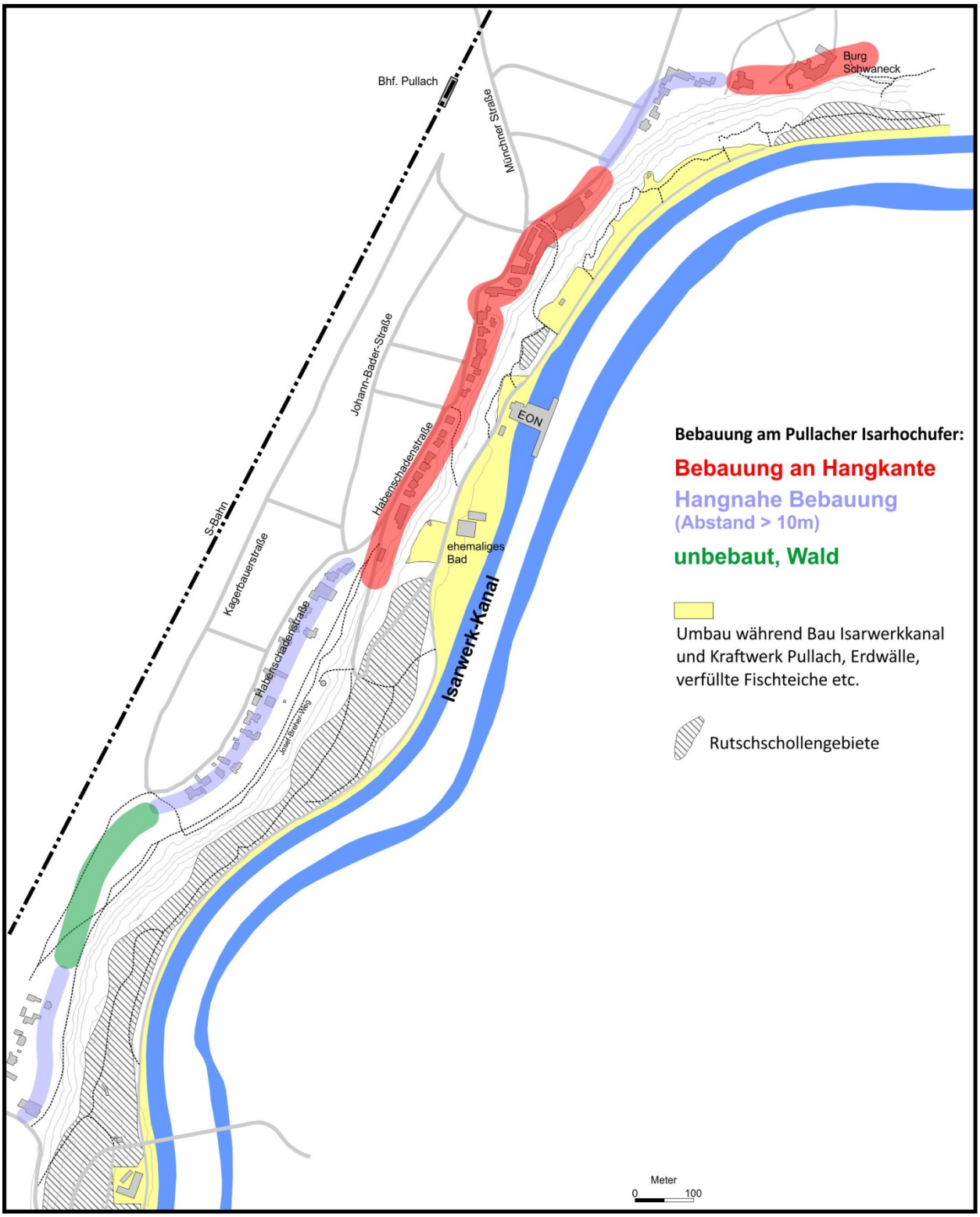


Abb. 27: Charakterisierung der Bebauungs- und Nutzungssituation im Bereich des Pullacher Isarhochufers.

Nahe dem heutigen Pullacher Kraftwerk wurde im Jahr 1892 das Pullacher Bad eröffnet, das bereits 1899 durch ein Hochwasser zerstört und nie wieder in Betrieb genommen wurde. Die Gebäude wurden 1904 von den Isarwerken aufgekauft. Zwei ehemalige Fischteiche am Hangfuß

wurden von den Isarwerken verfüllt. Durch die Trockenlegung der Teiche wurde die Bewässerung des Hangfuß, welche sich negativ auf die Hangstabilität auswirkt, reduziert. Ein vergleichbarer Effekt, in noch größerem Ausmaß, konnte Anfang der 1950er Jahre durch den Bau der Kanalisation erzeugt werden. Durch die Sammlung des Oberflächenwassers fielen in der Folge viele Schichtquellen am Hangfuß trocken. Die noch schüttenden Quellen wurden für die frühere Wasserversorgung von Pullach genutzt, wovon heute noch Pumpenhäuser unterhalb der Rabenwirtes und südlich Habenschadenstraße 6 zeugen. Nördlich der Grünwalder Brücke zeugen Fundamentreste von einem ehemaligen künstlichen Wasserfall als Ableitung von Kühlwässern (Kap. 5.4). Ebenso finden sich auf den Rutschschollen Nr. 10 und 11 die Fundamentreste eines Hauses sowie den zugehörigen Betonsockel des Einfahrtstores. Während des zweiten Weltkriegs wurden Bunker in der standfesten Nagelfluh im Bereich des Treppenwegs angelegt, sowie Splittergräben und Einmannbunker um das Werk.

Neben der hangnahen Bebauung im Ortsteil Pullach wird das gesamte Hochufer und der Hangfuß von Freizeitsportlern genutzt. Etliche Wander- und Radwege durchziehen den Hangfuß und liegen inmitten der Transport- und Ablagerungsbereiche potentieller Massenbewegungen.

5.6.2 Isarwerkkanal und Sylvensteinspeicher

Der Isar-Werkkanal folgt der Isar als Seitenkanal westlich auf einer Länge von ca. 12 km und dient hauptsächlich der Energiegewinnung. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts errichteten die Isarwerke südlich von München zwei Wasserkraftwerke an der Isar, 1894 das Wasserkraftwerk Höllriegelskreuth und 1900 das Wasserkraftwerk Pullach. Zum Betreiben dieser Kraftwerke wurde bei Buchenhain ein Teil des Wassers der Isar in einen Werkkanal ausgeleitet, der zunächst bei der Großhesseloher Brücke wieder in die Isar mündete und später verlängert wurde. Parallel zum Bau des Werkkanals erfolgte auch eine Regulierung der Isar in diesem Streckenabschnitt. Mit dem Bau des Isarwerkkanals waren daher große Umgestaltungen des Isarbetts und Erdarbeiten verbunden. So finden sich auf lange Strecke entlang des Pullacher Ufers anthropogene Veränderungen (Dammschüttungen und Deponiematerial) der natürlichen Morphologie, die v.a. im Bereich des Wasserkraftwerkes stark ausgeprägt ist.

Zudem sei der Effekt des in den Jahren 1954 bis 1959 erbauten Sylvensteinspeichers erwähnt. Dieser war ursprünglich geplant, um eine konstante Wasserversorgung im oberen Abschnitt der Isar zu gewähren. Der zusätzliche Hochwasserschutz war dagegen ein sekundäres Ziel. Dieser wurde noch verstärkt durch die Dammerhöhung in den Jahren 1994 bis 2001. Seit dem Bau des Sylvensteinstausees herrscht im Flussbett der Isar daher ein Mangel an Geschiebe aus den Alpen, weswegen die Eintiefung der Isar beschleunigt wird [U 25].

5.6.3 Grünwalder Isarbrücke

Im Bereich der Isarbrücke zwischen Grünwald und Pullach bewegt sich der westliche Isarhang auf einer Länge von einigen hundert Metern in Richtung Isarkanal, wobei das Zentrum der Bewegung ca. 300 m südlich der Brücke liegt. Die alte Isarbrücke aus den Jahren 1903-1904 musste nicht zuletzt auch wegen dieser Hangbewegungen durch den Neubau ersetzt werden [U 22].

Detaillierte Ausführungen zu den Hangbewegungen und den geotechnischen Konsequenzen sowie zur Geschichte des Brückenneubaus wurden umfänglich von Herrn Dr. Baumann in diversen Publikationen und Berichten (z.B. [U 21] [U 22] [U 24]) dargestellt.

5.7 Bodenkennwerte - Parameterstudie

Für Standsicherheitsberechnungen von Hängen, die sich wie im Isartal in einem Grenzgleichgewicht befinden, sind die Eingangsparameter der auftretenden Boden- und Felsschichten von entscheidender Bedeutung. Folglich gibt es umfangreiche Literaturdaten, die jedoch auch eine mehr oder weniger große Streuung aufweisen können (siehe Tab. 16).

Im Folgenden werden exemplarisch einige ausführliche Studien angeführt. Darauf basierend wurde auch ein erstes generalisierendes Baugrundmodell mit charakteristischen Kennwerten für diesen Zwischenbericht abgeleitet, die in orientierende Standsicherheitsberechnungen Eingang finden (siehe Kap. 6.5).

Tab. 16: Zusammenstellung der in den Gutachten verwendeten Bodenparameter für die Standsicherheitsanalysen. Die unterschiedlichen Bezeichnung der Schichten in den Gutachten wurde zu einer einheitlichen Nomenklatur zusammengeführt.

	Reibungswinkel φ' [°]	**Kohäsion c' [kN/m²]**	**Wichte γ/γ' [kN/m³]**
Baumann (1988) Dissertation [U 20]			
Terrassen- und Deckenschotter	38,5	20	23/14
Nagelfluh (hart)	38,5	1000	25/16
Nagelfluh (mürb)	38,5	200	24/15
Flinz (verfestigt)	15	450	24/15
Flinz (mit Trennflächen)	15	50	22/12
Floss (1993) Bürgerhaus [U 47]			
Terrassenschotter	38,5	10	20,5/12
Nagelfluh	38,5	40	20,5/12
Deckenschotter	38,5	15	20,5/12
Flinz	27,5	20	19/9
Jung (2003) Habenschadenstraße 13 [U 49] (Werte Hangschutt und Tertiär aus Scherversuch)			
Hangschutt	22	50	-/18
Terrassenschotter	40	0	-/21
Flinz	22	50	-/22
LfU (2004) Habenschadenstr. 13 [U 40]			
Hangschutt	35	0	20/-
Terrassenschotter	35	8	21/-
Nagelfluh	40	20	23/-
Deckenschotter	38,5	15	22/-
Flinz	18,5	0	22/-
BBB (2008) Treppenweg [U 3]			
Hangschutt	30-35 cal. 33	5-15 cal. 10	18-20 cal.19/-
Terrassenschotter/Verwitt.schwarte	22-27,5 cal. 25	0-5 cal. 3	17-19 cal. 18/-
Nagelfluh	45	30	20-23 cal. 21/-
Flinz	35	20	20-23 cal. 22/-
Zentrum Geotechnik (2014) Habenschadenstraße 7 [U 55]			
Terrassenschotter	38	5	22/11,5
Nagelfluh	38	15	24/14,5
Deckenschotter	38	8	23/13
Flinz	27,5	20	20/11
Schwankungsbereich			
Hangschutt	22-35	0-50	18-20/18
Terrassenschotter	25-40	0-20	17-23/11,5-21
Nagelfluh	38-45	15-1000	20-25/12-16
Deckenschotter	38-38,5	8-20	20,5-23/12-14
Flinz	15-35	0-450	19-24/9-22

5.8 Kritische Hanghöhe nach Baumann

Der Begriff der kritischen Hanghöhe wird von Baumann (1988) in dessen Dissertation erstmals erwähnt und als ein „Maß für einen gerade noch stabilen Hang […] mit vorgelagerten Rutschmassen aus früheren Bruchvorgängen“ definiert (Baumann, 1988: 129 [U 20]). Durch Rückrechnen des Bruchkörperaufbaus der Rutschung von Grünwald 1970/75 und Höllriegelskreuth sowie FE-Berechnungen wurde eine kritische Hanghöhe (Höhendifferenz zwischen Hochufer und „Nackentälchen“ alter Rutschmassen) für diesen Bereich der Isar von 38 bis 40 m errechnet.

Aufgrund Schwankungen des geologischen Modells und der im Gelände und Labor meist nur näherbaren geomechanischen Parameter sind die Berechnungen mit Unsicherheiten behaftet. Maßgeblich ist hier nach Baumann (1988):

- Innerhalb des Flinz: Festigkeit, Trennflächencharakteristika, Lage von verfestigten Zwischenlagen im Flinz
- Innerhalb des Konglomerats: Verteilung und Ausbildung von Schwächezonen

Auf Grundlage der von Baumann ermittelten kritischen Hanghöhe wurden die westlichen Isarhänge im Bereich von Pullach mit diesem Kriterium bewertet. Das Ergebnis ist in folgender Abbildung dargestellt und wird außerdem in den Standsicherheitsanalysen (Kapitel 6.5) nochmals aufgegriffen. In den rot markierten Bereichen ist die kritische Hanghöhe definitionsgemäß erreicht, blau markierte Bereiche dagegen erreichen zwar ebenfalls über 40 m Hanghöhe, allerdings nicht im kritischen Bereich zwischen Hangkante und basalem Nackentälchen.

Kommentar: Die Ergebnisse weisen lediglich Zonen aus, in denen die Disposition für Großrutschungen gemäß dem Berechnungskriterium nach Baumann gegeben ist. Diese sind ohne weitere Begutachtung und Bewertung nicht mit Gefahrenzonen oder Risikozonen gleichzusetzen. Sie stellen eines von mehreren Kriterien dar, die in der Gefährdungsanalyse in Kapitel 6.6 Eingang finden.

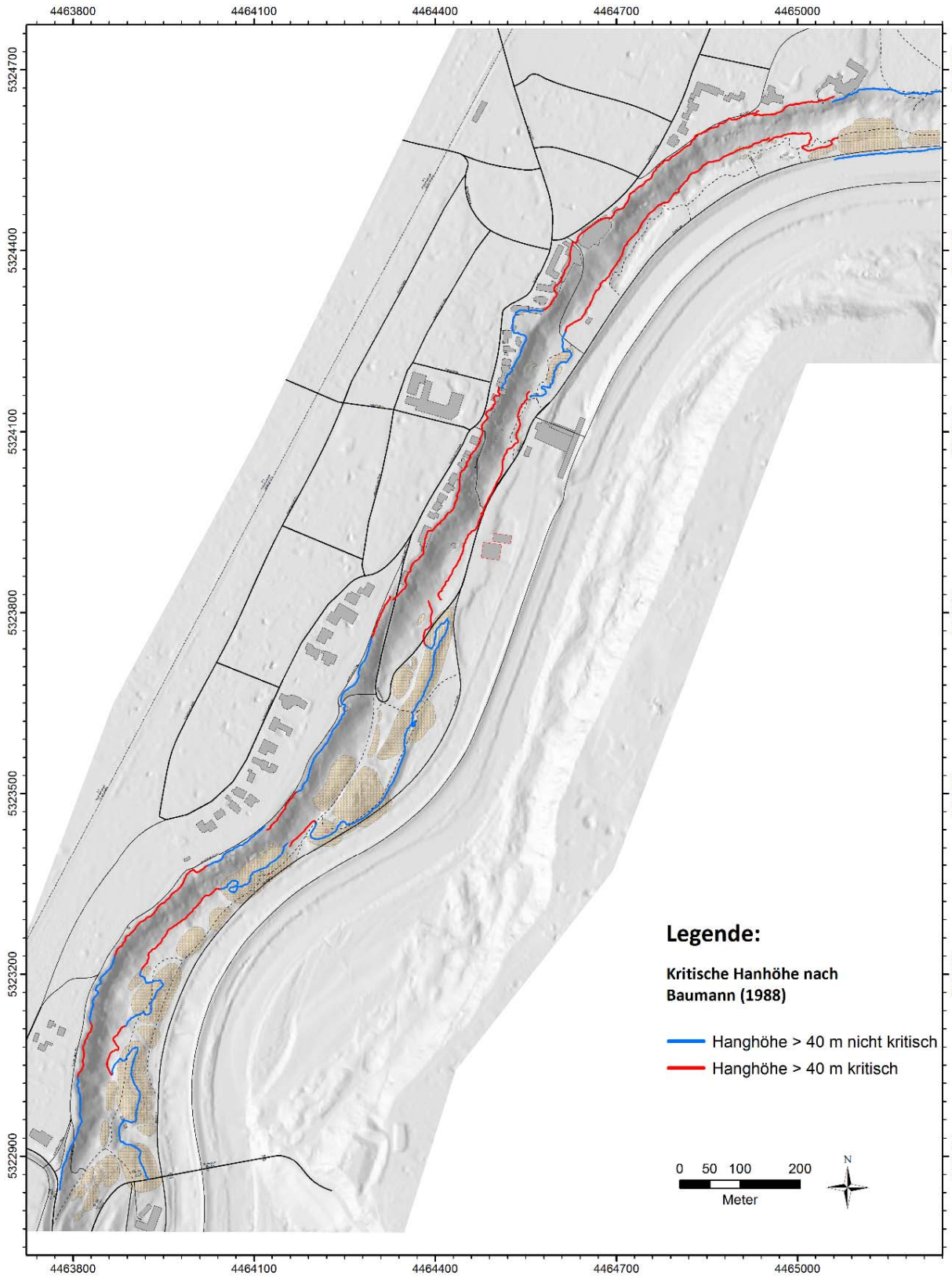


Abb. 28: Darstellung der kritischen Hanghöhe im Projektgebiet (nach Baumann, 1988).

5.9 Hangbewegungsmonitoring

Seit den 1970er Jahren werden Vermessungen an beiden Hochufern der Isar in Pullach und Grünwald durchgeführt. Dabei kamen und kommen verschiedenen Systeme zum Einsatz:

- Geodätische Vermessungsnetze
- Bohrlochinstallationen (Stangenextensometer, Inklinometer, Gleitmikrometer, Trivec-Sonde)
- Kluftspione
- Konvergenzmessstrecken

Seit 1970 werden im Isartal die Bewegungen von Rutschkörpern und Deformationen der Hänge durch geodätische (Präzisionstachymeter) und geotechnische (Inklinometer, Drahtextensometer etc.) Deformationsmessungen erfasst. Die ersten Messstellen wurden an den Rutschungen der Grünwalder Hangflanke von 1970 und 1975 und im Bereich der alten Grünwalder Brücke installiert. Auf Pullacher Seite wurden im Bereich der Burg Schwaneck, beim Bürgerhaus sowie unterhalb des Becker-Anwesens (Habenschadenstraße 33) Messstellen errichtet, des Weiteren auch im Rutschbereich an der Grünwalder Brücke (Abb. 29). Die messtechnisch instrumentierten Erkundungs- und Schrägbohrungen, die zur Erkennung großräumiger Hangbewegungen und Rutschungen bis in die Flinzbasis eingreifen, sind mit zugehöriger Ausstattung in Tab. 17 zusammengefasst. Die Messungen in den Bohrungen wurden zum Teil nach wenigen Jahrzehnten aufgrund geringer Deformationen eingestellt, so geschehen unterhalb der Habenschadenstraße 33 bis 35 [U 40]. Messtechnisch bedient wurden / werden die Bohrungen durch das LfU, bzw. im Fall der Messstellen am Bürgerhaus durch das Zentrum Geotechnik der TU München.

Unsere Recherchedaten zum bestehenden Messstellennetz sind in Tab. 17 zusammengestellt. Zukünftige Messrunden und -auswertungen durch BBB im Auftrag der Gemeinde sind in Planung.

Tab. 17: Geotechnische instrumentierte Bohrungen am westlichen Isaraufer zwischen Grünwalder Brücke und Burg Schwaneck.

Bereich	Bohrung / Bez.	Ansatzhöhe [m ü. NN]	Teufe / Länge [m]	Neigung zur Horiz.	Ausstattung	Auftraggeber / Betreiber / Eigentümer:	Messung durch:
Burg Schwaneck	SB-4	ca. 540	35,0	38°	Stangen- und Drahtextensometer - seit 1989	Landratsamt München	LfU, ca. 3 Messungen pro Jahr
Bürgerhaus	NMB 1	Hangkante 582,9	60,0	90°	Inklinometer - seit 1989 (bis 1998?)	Gemeinde Pullach	Zentrum Geotechnik
	GMB 2	Hangfuß 536,3	40,0	34°	Gleitmikrometer / 3 Drahtextensometer - seit 1989	Gemeinde Pullach	LfU, ca. 3 Messungen pro Jahr
	TVB 3	Hangfuß 535,9	19,0	90°	Trivec-Messsonde - seit 1989 (bis 1998?)	Gemeinde Pullach	Zentrum Geotechnik
Habenschaden-straße 33-35	B1-Nord	Hangfuß	41,1	45°	Stangenextensometer - 1992 - 2013	? unklare Eigentums-verhältnisse	Messung durch LfU eingestellt, kein ungehinderter Zugang gewährt
	B2a	Hangfuß	42,0	45°	Stangenextensometer - 1992 – 2013?	? unklare Eigentums-verhältnisse	Messung durch LfU, ca. 3 Messungen pro Jahr
Grünwalder Brücke	B 1			-	Inklinometer - seit 1994	Staatl. Bauamt Freising	Messung durch LfU in Amtshilfe
	B 2			-	Inklinometer - seit 1994	Staatl. Bauamt Freising	Messung durch LfU in Amtshilfe
	B 9			46°	Stangenextensometer – seit 1994	Staatl. Bauamt Freising	Messung durch LfU in Amtshilfe

Nach unseren Recherchen liegen folgende geodätische Vermessungsnetze im Bereich unterhalb der Burg Schwaneck sowie im Bereich des westlichen Vorlands der Grünwalder Brücke vor.

Tab. 18: Bestehende geodätische Messprofile.

Messprofil	Lokalität	Auftraggeber / Betreiber / Eigentümer:	Messung durch:
Messprofil 1	Burg Schwaneck	Freistaat Bayern	LfU – Messungen wegen starker Vegetation eingestellt im Jahr 2006 Zusätzlich 5 Bohrungen mit Drahtextensometern
Messprofil 5	100 m nördlich Grünwalder Brücke	Staatl. Bauamt Freising	LfU – Messung nur nach Bedarf
Messprofil 2	200 m südlich Grünwalder Brücke	Staatl. Bauamt Freising	LfU – Messung nur nach Bedarf / Starkregen

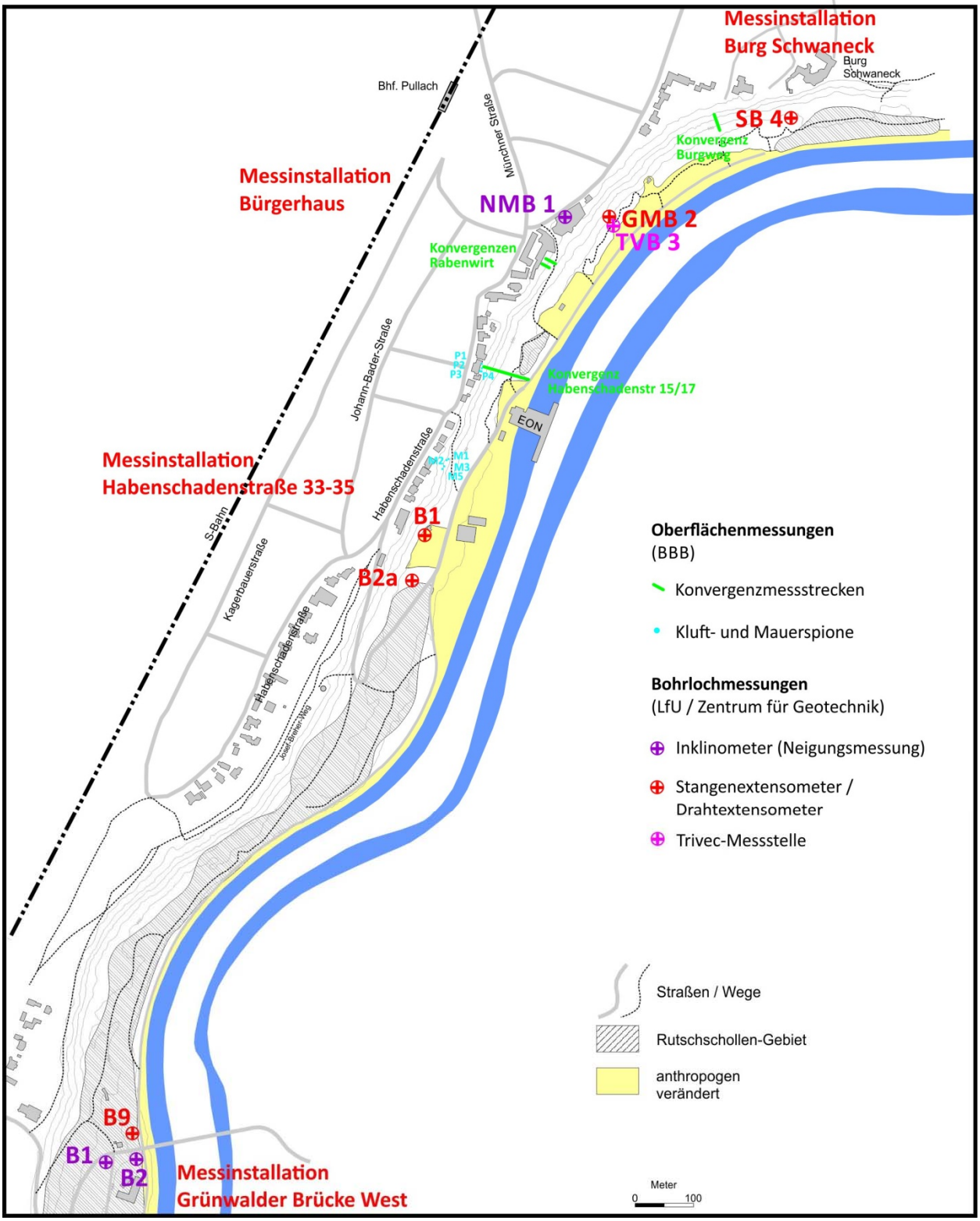


Abb. 29: Zusammenfassung der Monitoring-Einrichtungen am Pullacher Isarhochufer. Geodätische Vermessungsnetze sind nicht dargestellt.

Kluftspione und Konvergenzmessstrecken wurden ab 2005 im Zuge von Schadensanalysen und -prognosen von BBB an ausgewählten Standorten installiert und in unregelmäßigen

Abständen kontrolliert (Abb. 29). Eine Auflistung der Installationen findet sich in Tab. 19 und Tab. 20.

Tab. 19: Konvergenzmessstrecken, installiert durch BBB im Jahr 2014.

Konvergenzmessstrecken	Anzahl Intervalle (Teilmesstrecken zwischen Fixpunkten) und Kommentare
Burgweg	3 Intervalle
Rabenwirt 1 Rabenwirt 2	2 Intervalle (in Ausbruchbereich Rutsch 2013) 3 Intervalle (außerhalb Rutschbereich 2013)
Habenschadenstraße 15/17	9 Intervalle

Tab. 20: Kluft- und Mauerspione, installiert durch BBB in den Jahren 2005 [U 9] und 2013 [U 11].

Kluft- und Mauerspione	Anzahl der lokalen Messpunkte
Habenschadenstraße 15/17	4 Messpunkte an Gartenmauern (P1 - P4) (seit 2013)
Treppenweg (Habenschadenstraße 25/27)	4 Messpunkte in Konglomeraten (M1 - M5) (seit 2005)

6 Ingenieurgeologische Gefährdungsanalyse

6.1 Klassifizierung der Hangbewegungen am Pullacher Isarhang

In den folgenden Unterkapiteln werden die unterschiedlichen Massenbewegungsphänomene des Projektgebietes bezüglich ihres Versagensmechanismus, Prozesses, Volumens, Aktivität und Reichweiten beschrieben.

Der Begriff der „Intensität“ ist ein Maß für die Größe bzw. das Volumen, die Geschwindigkeiten und das Schadenspotential von Sturz- oder Rutschmassen. Im Rahmen der Gefährdungsanalyse in Kapitel 6.6 wird eine Klassifizierung der Prozesse nach Gefährdungsbildern durchgeführt, die i.Pr. auch eine Intensitätszunahme widerspiegelt und hier zum Verständnis vorangestellt werden soll:

Gefährdungsbild	**A**	Steinschlag – Blockschlag – Felssturz
Gefährdungsbild	**B**	Erosion von Lockermaterial
	B1	Hanganbruch durch Rutschungen
	B2	Hangkriechen
Gefährdungsbild	**C**	Großer Felssturz mit Hanganbruch
Gefährdungsbild	**D**	Großrutschung (Translations-Rotationsrutschungen)

Die Gefährdungsbilder sind in der Abbildung auf der folgenden Seite schematisch dargestellt. In diesem Kapitel werden zunächst Rutschprozesse (B und D) näher beschrieben und anschließend Sturzprozesse (A und C) erläutert.

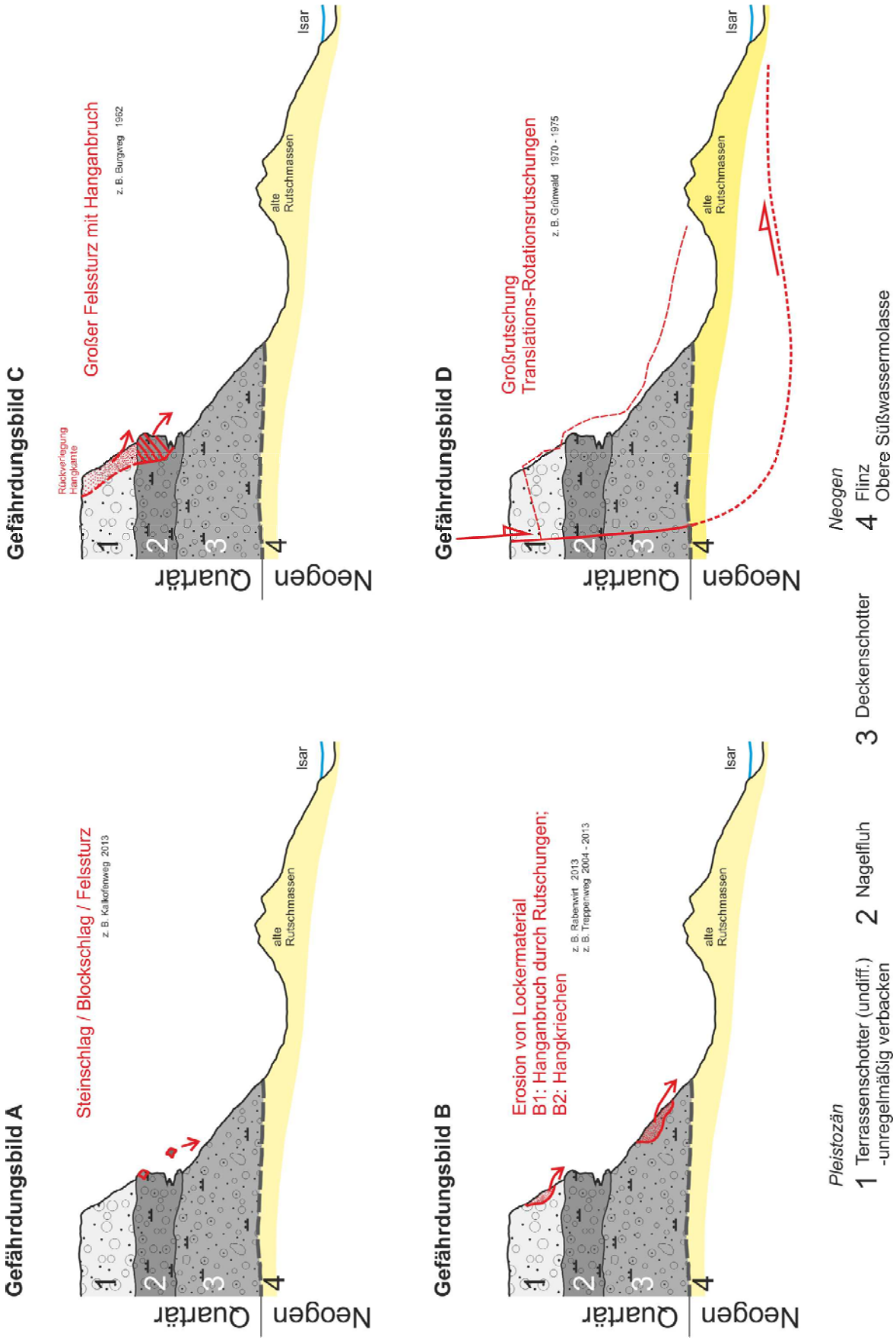


Abb. 30: Schematische Darstellung der prinzipiellen Gefährdungsbilder am Pullacher Isarhang.

6.1.1 Lockergesteinsrutschung / Hanganbruch

Lockergesteinsrutschungen/Hanganbrüche sind flachgründige Rutschungen innerhalb der Lockergesteins- und Verwitterungsdecke mit Abbruchkanten < 1 m (kleiner Hanganbruch) und > 1 m (großer Hanganbruch). Sie treten meist plötzlich im Zusammenhang mit Starkregenereignissen auf, wenn durch den erhöhten Wasserzutritt die Scherparameter (c, φ) reduziert werden. Vor dem Versagen kann es bereits zu Kriechbewegungen kommen, die durch hangparallele Risse im Erdreich oder „betrunkenen Wald“ zu erkennen sind. Das eigentliche Versagen tritt dann plötzlich und mit Geschwindigkeiten von mehreren Metern pro Tag oder höher auf. Dabei werden Tiefe und Ausbreitung von Hanganbrüchen maßgebend von Vegetation, Hangneigung und Mächtigkeit der Lockergesteinsbedeckung beeinflusst. Rutschungen, die sich auf die Lockergesteins- und Verwitterungsdecke beschränken, haben meist eine relativ steile Abbruchkante. Im Weiteren Rutschungsprofil entwickelt sich eine planare Gleitfläche, die abschließend wieder rotationsförmig an die ehemalige Hangoberfläche austritt. In den steilen Hangbereichen wurden bei der Kartierung Hanganbrüche zwischen weniger als 1 m³ bis über 700 m³ identifiziert. Die Bezeichnung „Hanganbruch“ richtet sich nach LfU-Empfehlungen [U 34]. Die weitere Differenzierung nach Höhe der Abbruchkanten, kleiner oder größer 1 m, ist an den Kartiermaßstab angepasst. Die Höhe der Abbruchkante beschreibt den vertikalen Abstand zwischen der Rutschungskrone und dem höchsten Punkt der planaren Gleitfläche.

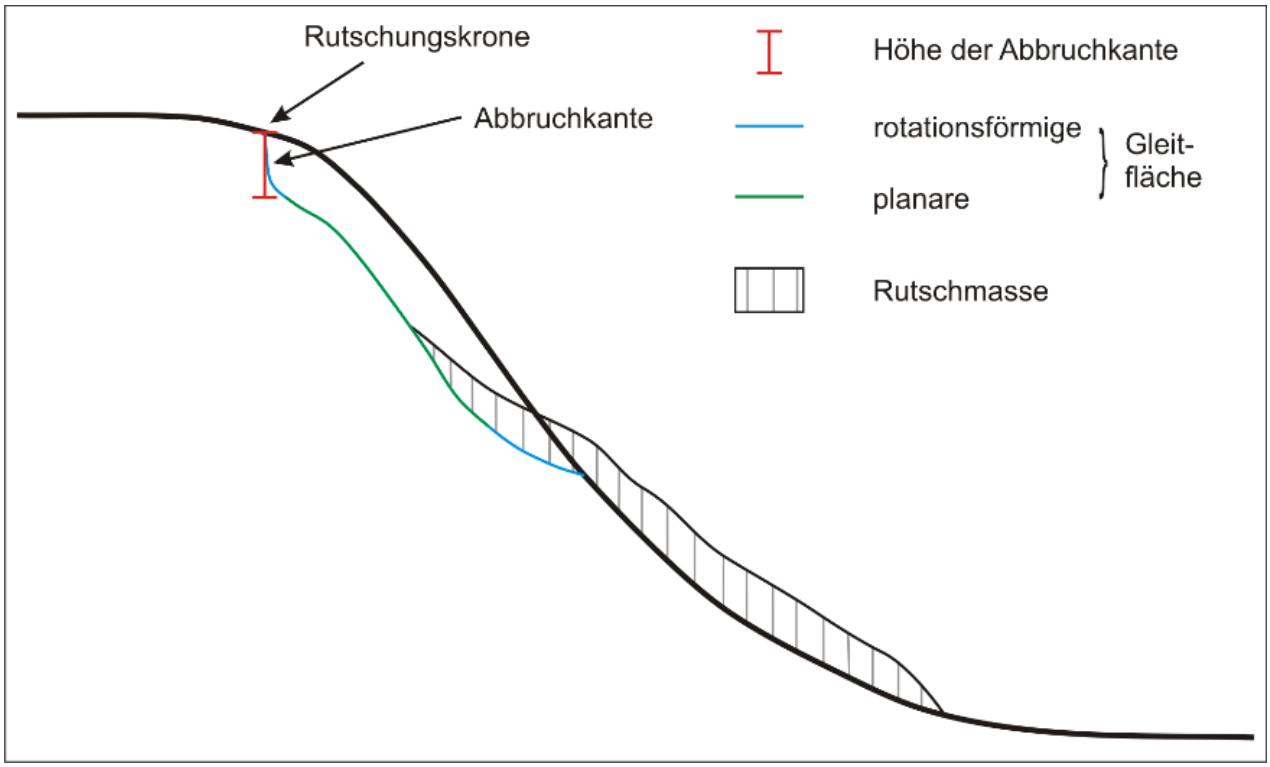


Abb. 31 Schematisches Profil einer Lockergesteinsrutschung mit Rutschungskrone, Abbruchkante und Gleitfläche.

Abb. 32: Lockergesteinsrutschung / Hanganbruch unterhalb des Bürgerhauses. Der Pfeil zeigt kompakte Schotter und Konglomerate, die ein Tieferreichen der Rutschungsbasis verhindern. Die Rutschmassen wurden ca. 20 m Richtung Isar transportiert. Blickrichtung Nordost.

6.1.2 Großrutschungen

Großrutschungen werden durch das Abgleiten großer Hangbereiche, bestehend aus der gesamten lithologischen Schichtfolge (glaziale Schotter, Konglomerate und neogener Flinz) entlang planarer (Translationsrutschung) oder kreisförmiger (Rotationsrutschung) Gleitflächen definiert. Anhand alter Rutschschollen im Kartiergebiet können Größen von einzelnen Schollen von bis zu 270 m Länge (Scholle Nummer 7) und 43 m Breite (Scholle Nummer 21) ermittelt werden. Die Rutschschollen sind in Abb. 16 und Tab. 21 dargestellt.

Wo und in welcher Größe ganze Hangbereiche abgleiten können, hängt von vielen Faktoren ab. Ein mechanisches Szenario sieht wie folgt aus: Durch (differentielle) Setzungen der harten Konglomeratbereiche in den weichen Untergrund (Flinz) kommt es zu Scherspannungen. Überschreiten diese Scherspannung die (Scher-)Festigkeit des calcitischen Bindemittels oder der Komponenten, so versagen diese an der schwächsten Stelle und es bilden sich vertikale Klüfte innerhalb des Konglomerates aus. Das durch die Talbildung fehlende Widerlager am Hangfuß sorgt dafür, dass die durch die Klüfte entfestigten Konglomeratbereiche und Deckenschotter in den Flinz-Untergrund einsinken und Richtung Isar gleiten können. Bei der Großrutschung in Grünwald 1970 (Tab. 15) konnten anfangs mittels Maßband Horizontalverschiebungen von bis zu

1 dm/Tag gemessen werden. 80 % der seit 40 Jahren beobachteten Bewegungen fand innerhalb der ersten 10 Jahre statt [U 27]. Anzeichen einer beginnenden Großrutschung sind hangparallele Klüfte und Setzungen im Nahbereich der Hangkante.

Die Gleitflächen, auf denen sich die Rutschmassen isarwärts bewegen, sind innerhalb der quartären Ablagerungen meist kreisförmig ausgebildet, bevor sie sich innerhalb des Tertiärs zu planaren Scherbahnen entwickeln. Deshalb werden diese Rutschungen auch als (kombinierte) Rotations-Translationsrutschungen bezeichnet. Während der Rutschung bildet sich talseitig der Konglomeratscholle eine Melange aus Schottern, aufgearbeitetem Flinz und gelösten Konglomeratblöcken, die von den kompakten Konglomeratschollen akkumuliert und Richtung Isar geschoben wird. Das gesamte abrutschende Paket kann am Hangfuß liegende, alte, inaktive Rutschschollen weiter talwärts schieben bzw. reaktivieren und somit noch einen weitaus größeren Bereich beeinflussen. Auch ist es möglich, dass durch das fehlende seitliche Widerlager im Bereich der Konglomeratwand weitere Großrutschungen initialisiert werden.

Weitere Beschreibungen zu Großrutschungen werden in Kapitel 4 und 5.5 gegeben.

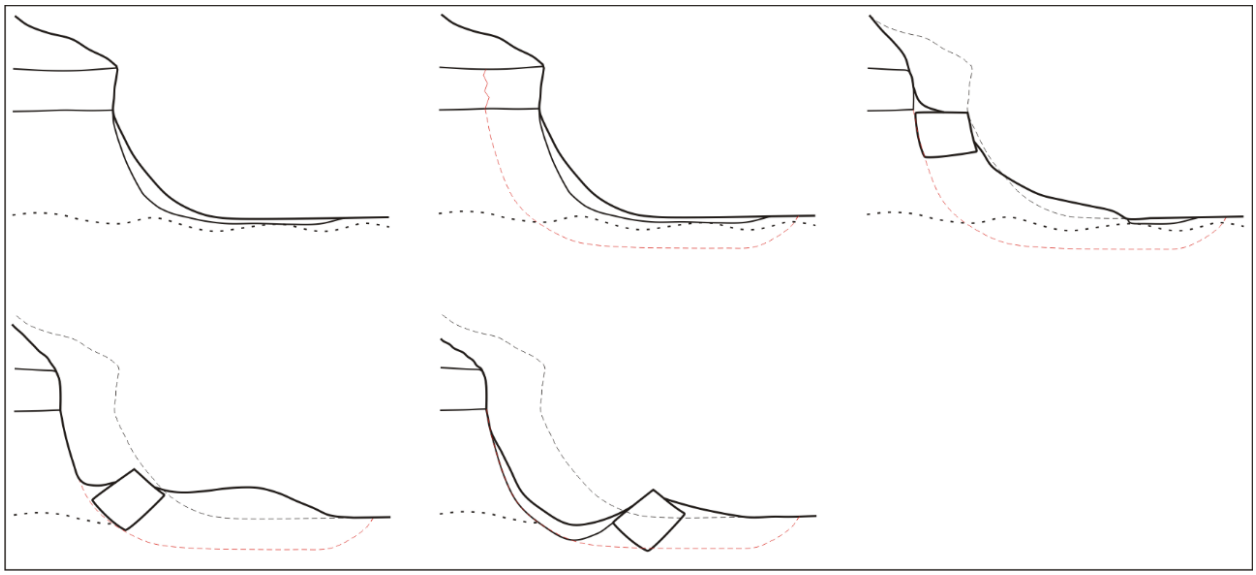


Abb. 33: Schematisches Profil einer kombinierten Rotations-Translationsrutschung mit den Phasen: Grenzgleichgewicht (1), Ausbildung von Klüften im Konglomerat (2), vertikale Setzungen und Verdrängen der unterlagernden Schichten (3), Übergang in ein planares Gleiten (4), reliktische Rutschscholle mit erodierter talseitiger Melange (5).

Abb. 34: Abrisskante in Terrassenschottern und Rutschungskopf mit betrunkenem Wald einer noch jungen, nicht näher lokalisierten Rutschung am Hang des Isartals bei Grünwald. Das Bild zeigt die in obiger Abbildung (Bild 3) skizzierte Phase. – Foto: H.J. Baumann [U 27].

Tab. 21: Zusammenfassung der markanten Rotations-Translationsrutschkörper im Projektgebiet. Streichen und Fallen der rotierten Schichtstapel entweder gepeilt oder durch Direktmessungen am anstehendem Konglomerat (kursive Werte) bestimmt.

Nr. des Rutschk.	Streichen/Fallen (nach Clar)	Alternative Nummerierung	Beschreibung
1	002/30	-	Hangseitig flach geböscht, geringe vertikale Mächtigkeit
2	006/32	-	Nackentälchen ausgebildet, sekundärer Rutschkörper (002/35) mit sehr steiler, talseitiger Flanke
3	352/75	-	Nackentälchen ausgebildet, beidseitig steile Flanken
4	*340/65*	-	Hangseitig flach geböscht, talseitig ca. 2-3 m Konglomerat anstehend, stark geklüftet, am ENE'-Ende Abbruch von ca. 10 m³ Konglomerat, teilweise steiler einfallend
5	298/-	-	Hangseitig sehr flach geböscht bzw. horizontal, sekundäre Rutschkörper am südlichen (242/10) und nördlichen (302/50) Ende
6	290/-	3 */**	Durch Straßenbau hangseitig angeschnitten, beidseitig gleich steil geböscht, kleine sekundäre Rutschung
7	*296/75* 282/35	2 */**	Große Rutschscholle. (Länge ca. 280m), **älter als 2800 Jahre** (bronzezeitlicher Hortfund), am nördlichen Ende Konglomerat anstehend, deutlicher Rutschkopf

Nr. des Rutschk.	Streichen/Fallen (nach Clar)	Alternative Nummerierung	Beschreibung
8	296/-	1 */**	Sehr steile talseitige Flanke, hangseitiger Bereich sehr flach/durch Forstweg überprägt, evtl. Staffelbruch von Rutschscholle Nr. 7, Alter > 2800 Jahre
9	336/15	5 */**	Steilhangnaher Rutschkörper mit steiler (evtl. anthropogen veränderter) talseitiger Flanke, sekundäre Rutschscholle (285/20)
10	*258/72* *266/50* *262/47*	4 */**	Anthropogen überprägte Oberfläche (ehem. Jaiserhaus, Techn. Leiter der Isarwerke), nach NE flach auslaufend, talseitig Konglomerat anstehend
11	320/10	1 ***/ 6 **	Deutlich geringere, durch Rotationsbewegung zum Hang hin geneigte Oberfläche wie vergleichbare Rutschkörper (Translation >> Rotation), ehem. Garten des Jaiserhauses
12	325/-	2 ***/ 7 **	Großer Rutschkörper mit zahlreichen kleineren sekundären Anbrüchen (ca. 1942, zerstörtes Betonfundament der Wasserleitung noch teilw. sichtbar), lokal Flinz zwischen sekundären Anbrüchen anstehend, im NE'-Teil hangseitig ca. 6 m lange Zerrspalte ausgebildet
13	300/-	3 ***	Hangnaher Rutschkörper, hangseitiger Bereich nahezu horizontal mit Hangschutt eingeebnet
14	320/-	-	Steilhangnahe Rutschscholle, sehr flache hangseitige Flanke
15	318/45	4 ***	Steilstehender Rotationsrutschkörper, der hangseitig der Scholle Nr. 16 aufliegt
16	300/-		Rutschkörper mit sekundärer, relativ junger Rotations-Rutschscholle (betrunkener Wald), kleiner ca. 4 m² großer Aushubbereich im Süden
17	-	6 ***	Sehr gering (5-10°) hangwärts einfallender Rutschkörper, im N' Teil Nackentälchen noch vorhanden, hangnah
18	290/15 270/30	5 ***	Sehr großer Rutschkörper mit vielen sekundären Rotationsrutschungen (u.a. Scholle Nr. 19), Nackentälchen im N' Teil, wo Scholle Nr. 17 nicht anliegt, vermutlich offen gelassener Nagelfluh-Steinbruch im S' Bereich
19	280/5	-	Größter sekundärer Rutschkörper der Scholle Nr. 18, flach hangwärts einfallend
20	*304/62*	7 ***	Hangseitig von Hangschutt überlagert, kleiner Abbau des talseitig anstehenden Konglomerats (Bankung im dm-Bereich)
21	-	8 ***	Großer Rutschkörper mit sehr steilen Flanken, anthropogen überprägt
22	*106/15*	9 ***	Möglicher Staffelbruch der hangseitigen Schollen, Konglomerat an der N' Flanke lokal anstehend, Nackentälchen ausgebildet
23	*308/25*		Teilweise mit Scholle Nr. 24 noch verbunden, weitere Desintegration entlang zweier Trennflächen, Nackentälchen ausgebildet, Konglomerat talseitig anstehend
24	*319/40*		Teilweise noch mit Scholle Nr. 23 verbunden, Nackentälchen ausgebildet, Konglomerat talseitig anstehend

* Bachelorarbeit Scherzer (2009), ** Bachelorarbeit Starce (2009), *** Bachelorarbeit Steinsdörfer (2009)

6.1.3 Steinschlag

Ein Steinschlag bezeichnet den Abbruch von Festgestein mit einem mittleren Durchmesser < 30 cm, das sich rollend und teilweise fallend von der Konglomeratwand löst und meist bereits im unteren Teil des Hanges zum Liegen kommt. Steinschläge treten periodisch als Folge einer langfristigen Materialentfestigung durch Verwitterung (Frost, Temperaturschwankungen, Wurzelsprengung) bevorzugt entlang von Trennflächen auf. Kurzfristig kann es durch Stürme zu einer erhöhten Steinschlagaktivität kommen, da von den Bäume die dynamische Belastung in den Boden abgeleitet wird [U 36]. Anzeichen für eine lokale Steinschlaggefährdung können nur bei einer detaillierten Untersuchung der Konglomeratwand entdeckt werden, da bereits wenige und kleine Trennflächen ausreichen, um kleine Gesteinskörper aus der Wand zu lösen. Steinschläge sind ein lokales, sehr begrenzt auftretendes Ereignis, das jedoch an Schwächezonen im Konglomerat gehäuft stattfinden kann. Auf die unterschiedliche Definition von Steinschlägen im Vergleich mit anderen Klassifikatioenn (z.B. des LfU) wird in Kapitel 6.1.4 eingegangen.

Bei der Geländearbeit zur geologischen Karte wurden frische Steinschläge (frische Konglomeratbruchstücke, keine Moosbildung oder Verfärbung), die vermutlich innerhalb der letzten 1 bis 3 Jahre abgestürzt sind, aufgenommen.

6.1.4 Blockstürze

Blockstürze werden durch den Abbruch von Konglomeratblöcken mit Größen zwischen 30 cm Durchmesser bis 5 m³ (kleiner Blocksturz) und 5 bis 10 m³ (großer Blocksturz) definiert, welche sich aus der Felswand lösen und rollend und teilweise fallend am Hangfuß oder im flachen Gelände zum Liegen kommen. Durch die höhere Masse der Blöcke ist im Gelände eine größere Reichweite als bei Steinschlag festzustellen. Ursache für Blockstürze sind, wie auch für Steinschläge, eine langfristige verwitterungsbedingte Materialentfestigung entlang von Trennflächen und kurzfristige Ereignisse wie Stürme. Anzeichen für die nahende Ablösung von Blockstürzen, wie auch für Steinschläge, können nur bei einer detaillierten Begutachtung der Konglomeratwände bestimmt werden.

Aufgrund von einfachen Kriterien wie Bewuchs mit Moos oder verwitterungsbedingter Verfärbungen der Oberfläche wurde zwischen jungen (Alter < 5 a) und alten (Alter > 5 a) Sturzereignissen unterschieden. Teilweise konnten bei jungen Blockstürzen aufgrund der frischen (helleren) Oberflächenfarbe die Abrissflächen in der Nagelfluh lokalisiert werden (Abb. 35).

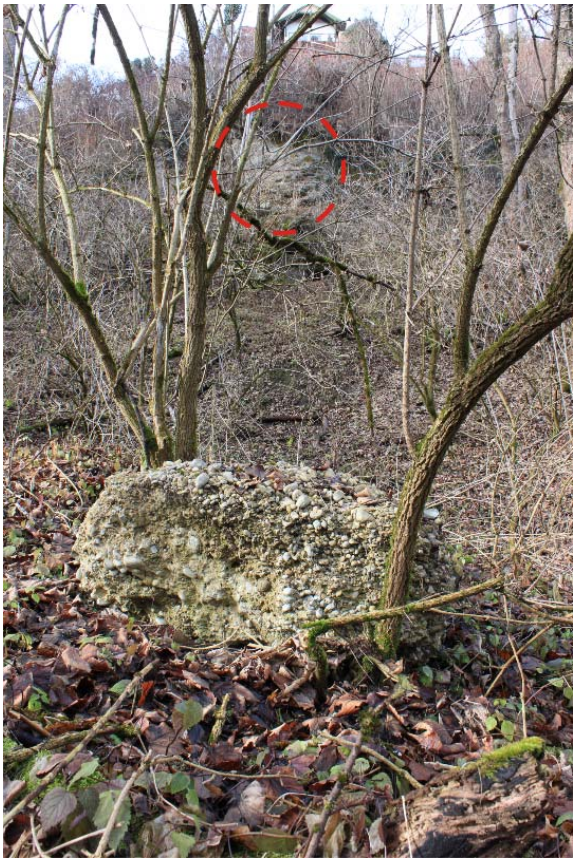


Abb. 35: Kleiner Blocksturz (jung) unterhalb Habenschadenstraße 21, der im flachen Bereich des Hanges zum Liegen kam. In der Nagelfluhwand oberhalb ist ein großer, unverwitterter Bereich zu erkennen (roter Kreis). Dabei handelt es sich um die Anbruchfläche.

Nach der Klassifikation des LfU [U 36] werden Stein- und Blockschlag zusammengefasst und innerhalb der Volumina 0 bis 10 m³ in drei Klassen (klein: bis 0,1 m³, mittel: 0,1 bis 0,6 m³, groß: 0,6 bis 10 m³) unterteilt. In dieser Arbeit wird aus praktischen Gründen eine eigene volumenbezogene Unterteilung, wie in Kapitel 6.1.3 und 6.1.4 beschrieben, eingeführt.

Kleine Stein-/Blockschläge haben nach [U 36] ein Volumen bis 0,1 m³ und bei einer mittleren Konglomeratdichte von ρ = 2,14 g/cm³ eine Masse von bis zu 214 kg. Diese Sturzblöcke können an dem steilen Relief der Isarhänge eine erhebliche kinetische Energie entwickeln und folglich auch ein großes Zerstörungspotenzial haben. Hier wird im Gegensatz dazu für Steinschläge ein maximaler Durchmesser von ca. 30 cm (entspricht einem runden Konglomeratblock von ca. 30 kg bzw. kubischen Kluftkörper von knapp 60 kg) und somit eine deutlich geringere kinetische Energie angenommen. Blockstürze, wiederum unterteilt in 2 Gruppen, umfassen den verbleibenden Bereich bis 10 m³.

Anmerkung: Das Konglomerat aus dem sich Sturzblöcke lösen, ist i.d.R. heterogen ausgebildet (Rollkies- oder Sandlagen, unterschiedlich starke Lithifizierung). Daher sind keine pauschalen Sturzvolumina im regionalen Maßstab prognostizierbar. Für konkrete Anlässe müssen Spezialuntersuchungen durchgeführt werden.

6.1.5 Felssturz

Die Bezeichnung „Felssturz“ steht in dieser Arbeit für den Abbruch eines großen Konglomeratbereichs (10 bis 100 m³), der sich zunächst kippend, anschließend rollend oder gleitend von der Felswand löst und sich Richtung Hangfuß bewegt. Das Lösen von der Wand geschieht entlang von Trennflächen (Klüften), die sich durch das Zusammenspiel von Verwitterung und Spannungsumlagerungen gebildet bzw. geöffnet haben. Anzeichen eines Felssturzes sind hangparallele, teilweise bereits weit geöffnete Klüfte und Risse an der Hangkante oder vertikale Klüfte an exponierten Wandbereichen (Abb. 36). Mögliche Auslöser von Felsstürzen können Frost, Temperaturschwankungen oder Starkregen sein (vgl. Felssturz von 2003 an der Hochleite südlich Jaiserbrünnerl in Kapitel 5.5 und Tab. 15). Der Zeitpunkt eines Felssturzes kann nicht unmöglich hinreichend prognostiziert werden, da neben weiteren Faktoren die rückhaltenden Kräfte nur schwer ermittelbar sind (z.B. intakte Felsbrücken entlang von Klüften).

Aufgrund der relativ geringen Höhendifferenz von unter 40 m zwischen Abbruch- und Ablagerungsgebiet kommt es nur zu einer geringen Desintegration (Zerlegung) und Interaktion der Sturzblöcke untereinander sowie eher geringen Reichweiten. Das Sturzmaterial wird zum Großteil im bewaldeten Hang gefangen („Walddämpfung“)

Die Klassifizierung von Felsstürzen des LfU (> 10 m³ bis < 10^6 m³ nach [U 37]) hat für die kartierten Sturzmassen die korrekte Bezeichnung: „sehr kleiner Felssturz“. Dieser Zusatz wird jedoch, da es hier die maßgebende Kategorie von Felsstürzen ist, nicht weiter verwendet. Bei Ereignissen wie dem Felssturz am Burgweg aus dem Jahr 1962 (Kapitel 4.1), der mit insgesamt 10 Konglomeratschollen (jede >10 m³) und einem geschätzten Gesamtvolumen von über 500 m³ das größte Sturzereignis im Projektgebiet darstellt, wird hier die Bezeichnung **großer Felssturz** gewählt.

Abb. 36: Potentieller Felssturzblock ca. 80 m südöstlich der Burg Schwaneck. Hangseitig ist die Felsnase bereits teilweise durch eine weit geöffnete Kluft von der Konglomeratwand abgetrennt. Der Fuß der Felsnase hat aufgrund erodierter Rollkieslagen teilweise kein Widerlager mehr (Blickrichtung Osten).

6.2 Analyse der Aktivität der Hangbewegungen

Im Rahmen von Gefährdungsanalysen sind probabilistische Angaben zu treffen. Neben der potentiellen Intensität eines zukünftigen Ereignisses ist es entscheidend zu wissen, wie wahrscheinlich das Eintreten ist. Detaillierte Ausführungen dazu werden zum Beispiel in [U 38] und [U 39] gemacht.

Die Wahrscheinlichkeit kann in verschiedener Weise qualitativ oder semiquantitativ erfasst werden. Zum Einen ist es möglich über Archive (Gutachten, Zeitungen, Zeitzeugen…) eine frequentistische Analyse durchzuführen und diese mit physischen Geländebefunden (z.B. frische Sturzblöcke) zu untermauern und Wahrscheinlichkeiten als Wiederkehrperioden zu beschreiben (frequentistische Analyse).

Zum Anderen können aber auch Informationen zu „Aktivitätsindikatoren“ und physischen Voraussetzungen (Disposition) sowie auslösenden Faktoren (z.B. Starkregen) gesammelt und gewichtet werden, um Wahrscheinlichkeiten zu definieren. Diese Betrachtungen werden in Kap. 6.6.3 aus den Kartierergebnissen abgeleitet und fließen in die Gefahrenkarten ein (Anlage 1.4, Anlage 1.5 und Anlage 1.6). Dies erlaubt regionale Differenzierungen, kann aber keine Detailuntersuchungen für spezielle lokale Fragestellungen ersetzen.

6.2.1 Frequentistische Analyse

Eine Vielzahl von Sturz- und Rutschereignisse der letzten Jahrzehnte ist dokumentiert (Abb. 37, Kap. 5.5). Eine Analyse dieser Ereignisse lässt auf Wiederkehrdauer bzw. Frequenzen der unterschiedlichen Massenbewegungen schließen.

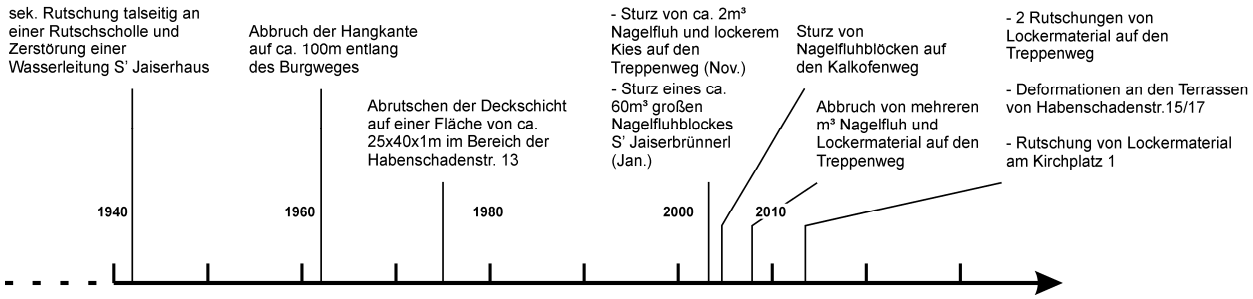


Abb. 37: Zeitstrahl der Massenbewegungen im Bereich der Gemeinde Pullach ab 1940. Da sie vermutlich als nicht relevant eingestuft wurden, finden sich in der Literatur keine Lockergesteinsrutschungen / Hanganbrüche vor 2003.

Großvolumige Ereignisse wie **Großrutschungen** und **Felsstürze** haben, unabhängig von dem weiteren Transport der Massen, eine Gemeinsamkeit im Loslösen großer Konglomeratbereiche (> 10 m³, Kapitel 6.2.2). Dafür müssen, neben weiteren Faktoren wie z.B. einem fehlenden Widerlager, sich über längere Zeit hinweg im intakten Konglomerat Klüfte entwickeln. Dieser Prozess kann mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte andauern, was sich in nur 2 dokumentierten Felsstürzen (1962, 2003) seit 1940 im Projektgebiet widerspiegelt.

Nimmt man nun zu dieser Analyse der historischen Ereignisse den Ist-Zustand der Konglomeratwände mit den in Tab. 30 dokumentierten Schwächezonen, so ist für Felsstürze von einer Wiederkehrdauer von Jahrzenten auszugehen.

Aufgrund fehlender dokumentierter Rotations-/Translationsrutschungen ist für Großrutschungen eine Bestimmung der Frequenz deutlich schwieriger. Angesichts der sehr lang andauernden Bewegungen von Großrutschungen (vgl. die bis heute andauernde Rutschung Grünwald von 1970/75), entspricht die Frequenz bzw. Wiederkehrdauer der Zeit zwischen zwei Neuanbrüchen. Für eine grobe frequentistische Analyse wird diese Zeit für Rotations-Translationsrutschungen, basierend auf folgenden Daten, mit mehreren Jahrhunderten abgeschätzt:

- Kartierung: ein bronzezeitlicher Fund in der Rutschscholle Nr. 7 zeigt, dass diese möglicherweise ein Alter von mindestens 2800 Jahren besitzt. Das allgemeine Erscheinungsbild der Rutschscholle (Verwitterung, Ausbildung der hangseitigen Abrisskante, Bewuchs) entspricht dem der anderen im Projektgebiet gefundenen

Rutschschollen. Folglich ist nicht auszuschließen, dass die Rutschschollen am Hangfuß über mehrere Jahrhunderte bis Jahrtausende dort bestehen bleiben können. Eine zeitliche Abgrenzung der Großrutschungen in die Vergangenheit ist somit seit der Tiefenerosion der Isar in die Münchener Schotterebene nicht möglich. Wenn die Rutschschollen über einen so langen Zeitraum am Hangfuß bestehen bleiben, gab es seither in diesem Bereich keine jüngeren Großrutschungen, welche die alten Rutschkörper weiter Richtung Isar geschoben hätten. Des Weiteren bilden die alten Rutschkörper mit Bezug auf die beschriebene Versagensmechanik ein konstantes Widerlager am Hangfuß, welches sich durch relativ zum Hangschuttmaterial erhöhten Reibungswiderständen stabilisierend auf die hangseitigen Bereiche auswirken kann.

- stumme Zeugen: deutlich jüngere Hinweise auf die Aktivität der Großrutschungen gibt die Bebauung am westlichen Hochufer. Zu nennen sind hier die „Alte Heilig Geist Kirche“ und der hangseitig anschließende Friedhof im Ortskern von Pullach, die in den Jahren 1488 bis 1489 erbaut wurden. Weitere ältere Gebäude, die heute direkt an der Hangkante liegen sind die Burg Schwaneck, deren ältester Kern 1843 fertiggestellt wurde, das Gasthaus Rabenwirt bzw. der ehemalige Bauernhof (Neunerhof) am Kirchplatz 1, der Anfang des 19. Jahrhunderts erbaut wurde, und die Walter-Villa (Habenschadenstraße 25) aus dem Jahr 1907. Diese Gebäude zeigen, wie auch der Vergleich der heutigen Hangkante mit der historischen Karte von 1841, dass sich die Hangkante auf der Pullacher Seite mindestens in den letzten 100 Jahren nicht stark verändert hat.
- Monitoring: Im Bereich des Hangfußes, unterhalb der hangnahen Bebauung, wurden vom LfU in den 1970er Jahren mehrere Probebohrungen mit Extensometer-messgeräten ausgestatten (Kap. 5.9). Im mittleren und nördlichen Bereich des Projektgebietes sind in den mehrere Jahrzehnte andauernden Messungen keine Hinweise auf tiefgreifende Brüche zu finden. Hingegen zeigt das Monitoring im Bereich der Grünwalder Brücke andauernde Bewegung.

Bei mittelgroßen Ereignissen wie **Blockstürzen** ist das aus der Felswand zu lösende Volumen deutlich geringer. Folglich kann es häufiger zu Ablösen von Sturzblöcken kommen. In der jüngeren Vergangenheit ereigneten sich mehrere Blockstürze auf die Wege entlang der Isarhänge (Kalkofenweg, Treppenweg), die jedoch nur eine sehr lokale Analyse der Sturzereignisse darstellen. Folglich kann jedoch auf eine mehrjährige Wiederkehrdauer von Blockstürzen geschlossen werden, wobei kleinere Blockstürze noch höher-frequent auftreten können (jährlich).

Steinschläge treten an den Isarhängen häufig auf. Die Wiederkehrdauer / Frequenz ist generell hoch (Monate, Wochen…).#

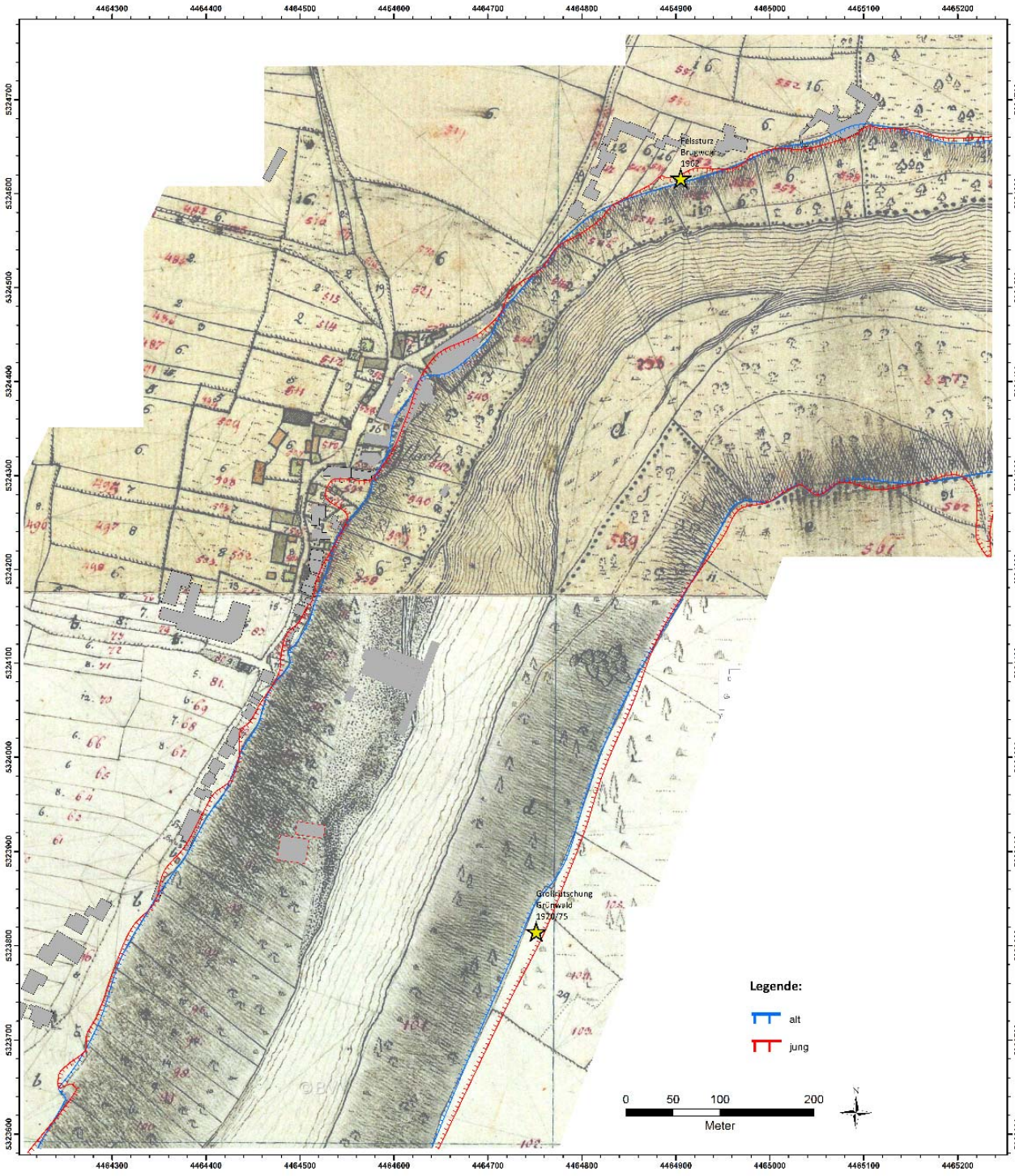


Abb. 38: Vergleich der Hangkante heute – 1841 (Quelle: heute (dgm2 des Landesamtes für Vermessung), 1841 (Bayernatlas, historische Karte 1817-1841).

Hanganbrüche sind in ihrer Größe und ihrem Auftreten sehr von äußeren Faktoren (z.B. Vegetation, Lockergesteinsauflage) bestimmt, sodass eine frequentistische Analyse nur mit

großen Ungenauigkeiten möglich ist. Trigger sind u.a. Starkregenereignisse, wie die wiederholten Ereignisse seit 2003 am Treppenweg und am Rabenwirt zeigen. Sie treten meist zwischen Mai und August, mit jährlichen Schwankungen auf (Abb. 22). Ist die Lockergesteinsauflage durch einen Hanganbruch abgetragen, so kann sich die Rutschmasse weiterhin noch in Bewegung befinden oder angrenzende Schichten durch den fehlenden seitlichen Halt aktiviert werden (vgl. KVM 2+3 in Kap. 6.3.2). Zusammenfassend ist festzustellen, dass Hanganbrüche, ob groß oder klein, bei entsprechenden Umwelteinflüssen jährlich auftreten können.

Tab. 22: Anzahl der jungen und alten Rutsch- und Sturzereignisse am W' Isarufer im Bereich von Pullach, auf Grundlage der geologischen Kartierung. Ältere Steinschläge wurden aufgrund ihrer Häufigkeit nicht kartiert. Bei den Großrutschungen wurden sekundäre Rutschungen nicht mit aufgenommen.

	jung	**alt**
Steinschlag	7	-
Blockschlag klein	29	105
Blockschlag groß	0	33
Felssturz	0	4
Hanganbruch klein	43	15
Hanganbruch groß	22	24
Großrutschung	0	37

6.2.2 Regionale Differenzierung der Aktivität

Auf Grundlage der kartierten Sturz- und Rutschereignisse im Projektgebiet lässt sich in einigen Fällen eine regionale Differenzierung der Massenbewegungen erstellen.

Lockergesteinsrutschungen treten in jedem Hangbereich des Projektgebietes zwischen der Burg Schwaneck und der Grünwalder Brücke, von der Hangkante bis zum Hangfuß auf. Das rutschanfällige Material (Schotter und Verwitterungsschwarte) sowie eine hohe Neigung der Hänge sind überall vorhanden. Lokale Variationen der Rutschungsanfälligkeit können bedingt sein durch:

- zusätzlich in den Hang geleitetes Wasser (Regenwasser, Rohrbruch)
- Art und Zustand der Vegetation
- Mächtigkeit und Überdeckung des Konglomerates

Falls letzteres an der Geländeoberfläche anstehend ist, bildet es eine natürliche Barriere für Lockergesteinsrutschungen und beschränkt diese meist auf den Bereich oberhalb oder unterhalb des Konglomerates. Dadurch ist automatisch auch die Größe, nicht aber die Höhe der Abbruchkante limitiert. Wenn Lockergesteinsrutschungen in Bereichen ohne anstehendes

Konglomerat im Hangprofil abrutschen, können sie von der Hangkante bis zum -fuß eine Länge von über 60 m erreichen (Entfernung Abrisskante bis maximale Reichweite).

Alte **Rotations-Translationsrutschungen** finden sich im gesamten Projektgebiet, ausgenommen im Ortsteil Pullach, girlandenartig mit einem Abstand von ca. 20 m entlang des Hangfußes aufgereiht. Keine Rutschschollen hingegen finden sich nördlich des Kalkofenweges bis zum Burgweg, da hier bis auf die Rutschscholle Nr. 5 alle morphologischen Indizien von Großrutschungen durch anthropogenen Einfluss (vermutlich beim Bau des Isarwerkkanales) entfernt wurden. Großrutschungen haben, falls sie stattfinden oder reaktiviert werden, Auswirkungen auf den gesamten Hang, von mehreren Metern hinter der Hangkante bis zum Werkkanal.

Steinschläge und Blockstürze sind häufig und fast im gesamten Projektgebiet zu finden. Die großvolumigen Ereignisse treten vor allem in Bereichen mit einer ausreichenden (> 2 m) Mächtigkeit des anstehenden Konglomerates auf. So sind im Bereich der Grünwalder Brücke bzw. Dr. Carl von Linde Straße oberhalb der Rutschschollen Nr. 22 bis 24 weder Konglomerat noch Sturzblöcke zu finden. Auch sind südlich der Habenschadenstraße 29 bis zur Rutschscholle Nr. 12, im Vergleich zum restlichen Projektgebiet, wenige bis gar keine Blockstürze vorhanden.

Durch die heterogene Beschaffenheit des Konglomerates bzgl. Überhängen und Rollkieslagen kann es neben einer lokalen Reduzierung auch zur Erhöhung der Stein- und Blocksturzaktivität kommen (z.B. 140 m nordöstlich des Bürgerhauses).

Im Bereich zwischen den Rutschschollen Nr. 13 bis 17 ist auffällig, dass lediglich ältere (> 5 a) Sturzmassen zu finden sind. Die Aktivität von Steinschlägen und Blockstürzen ist im gesamten Projektgebiet zu erkennen, jedoch mit erheblichen lokalen Unterschieden. Die alten Sturzmassen sind ein wichtiger Indikator für zukünftige Ereignisse und geben einen Hinweis, welche Reichweiten zu erwarten sind (stumme Zeugen).

Im gesamten Projektgebiet wurden vier **Felsstürze** kartiert, davon befinden sich drei im nördlichen und einer im südlichen Kartenblatt. Aufgrund der wenigen Ereignisse und den vielen Faktoren, die für ein Versagen verantwortlich sind, ist eine aussagekräftige regionale Differenzierung von Felssturzereignissen nicht möglich.

6.3 Deformationsmessungen

6.3.1 Ergebnisse des Monitoring in Borlochmessstellen

Kommentar: Zur Auswertung und Interpretation der Deformationsmessungen, die nicht von BBB durchgeführt wurden, kann an dieser Stelle nur eine grobe Zusammenfassung gegeben werden. Bisher liegen uns nur unvollständige Messreihen vor.

Eine vollständige Erhebung sowie Neuaufnahme von Messungen unter Betreuung durch BBB ist in Planung.

Burg Schwaneck: Die Extensometermessungen zeigen lediglich oberflächennahe Bewegungen in den Rutschmassen am Hangfuß unterhalb der Burg. Diese Bewegungen sind allerdings sehr gering (ca. 15,3 mm in 25 Jahren zwischen GOK und 15 m Bohrlochtiefe, Stand 2014) [U 21].

Im ersten bzw. obersten Abschnitt der Extensometermessung (0 bis 15 m), horizontale Entfernung zur Hangkante 11,8 m, wurde seit Messbeginn 1989 bis 2014 eine horizontale Dehnung von ca. 12,1 mm gemessen. Die durchschnittliche horizontale Bewegungsrate liegt somit für diesen Bereich bei ca. 0,48 mm / a. Jedoch sind deutliche Beschleunigungen in den Zeiträumen Frühjahr 1994, Winter 2002/03 und Frühjahr 2013 erkennbar, welche jeweils mit Starkregenereignissen zusammenfallen. Die Messabschnitte 2 (Bohrlochachse 15 bis 26 m) und Messabschnitt 3 (Bohrlochachse 26 bis 35 m) liegen innerhalb der neogenen Tone und Schluffe und zeigen horizontale Dehnungen von ca. 2,0 mm (Abschnitt 2) und ±0 mm (Abschnitt 3).

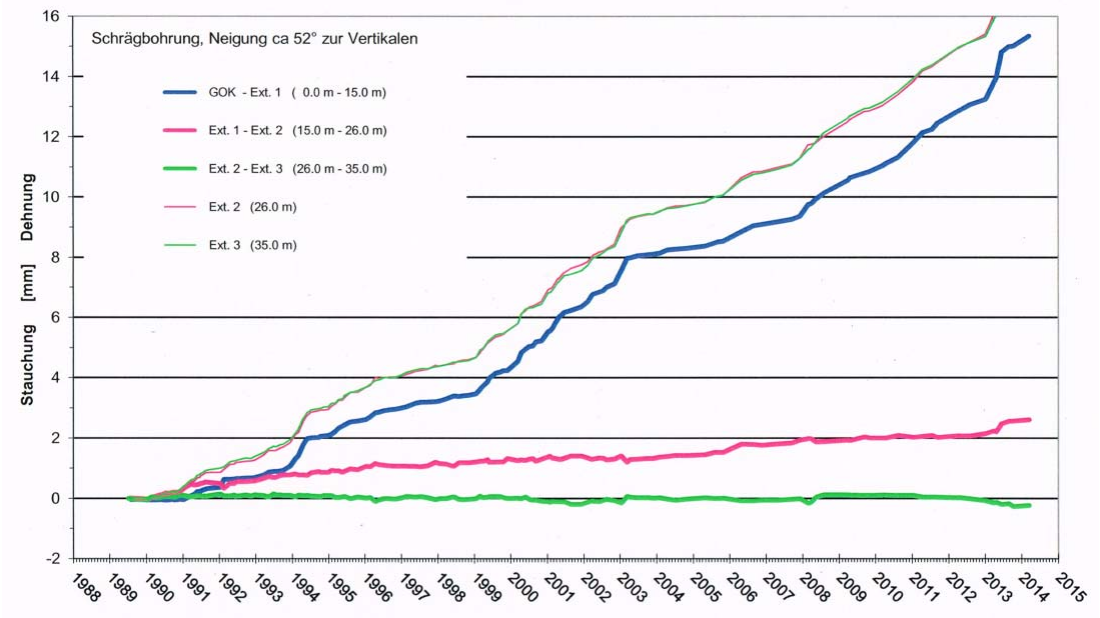


Abb. 39: Messergebnisse des Stangenextensometers am Hangfuß unterhalb der Burg Schwaneck (SB-4). Rot hervorgehoben sind Beschleunigungen innerhalb der obersten Bodenmeter (Quelle: verändert nach Datenbestand des LfU).

Am Bürgerhaus: Die im Bürgerhaus und am Hangfuß eingebauten Messeinrichtungen zeigen bis 1998 / 1999 ebenfalls nur geringe oberflächennahe Bewegungen an [U 21].

Die Neigungsmessungen (Inklinometer) direkt im Bürgerhaus zeigen im Messzeitraum von November 1996 bis März 1999 sehr geringe Bewegungen senkrecht zum Isarhang von ca. 2,0 mm nach E und parallel zum Isarhang nach N von ca. 3,7 mm. Die zwei Messeinrichtungen am Hangfuß messen lediglich hangparallele Bewegungen innerhalb der Deckschichten von Juli 1989 bis April 1998. Das Gleitmikrometer zeigt bis ca. 4,5 m u. GOK eine Dehnung innerhalb der letzten neun Jahre von ca. 3,7 mm. Die Trivec-Sonde zeigt im gleichen Zeitraum in Z- (Setzung und Hebung) und Y-Richtung (senkrecht zum Hang) keine nennenswerten Bewegungen, lediglich in X-Richtung (hangparallel) wurden in den Deckschichten bis 2 m u. GOK 5 mm Dehnung Richtung Isar gemessen.

Im Gutachten wird ein weiterer Messzyklus im Frühjahr 2002 empfohlen, jedoch liegen uns diese Ergebnisse nicht vor.

Habenschadenstraße 33-35: Die Messungen an den zwei Stangenextensometern wurden 2013 nach 18 Jahren von Seiten des LfU eingestellt [U 41]. Die bis dahin gemessenen Verformungen waren sehr gering.

In der N‘ Bohrung wurden bisher lediglich 1,2 mm Stauchung entlang der Bohrachse festgestellt, die sich ab 2002 fast ausschließlich in dem Bereich zwischen 10 und 30 m ereignete. Die Stangenextensometer in der S‘ Bohrung zeichneten nur im Bereich zwischen 17 und 30 m seit 2000 eine konstante Dehnung von 0,8 mm auf, die Bewegungen innerhalb der obersten Messstrecke sind saisonale Temperaturschwankungen.

Grünwalder Brücke: Die vorliegenden Daten zeigen an, dass der Hang südlich der Brücke als aktiver Rutschhang zu werten ist [U 21]. In B9 konnten Horizontalverschiebungen bis 2,5 mm / a nachgewiesen werden.

Schlussfolgerung zum Verhalten der Großrutschungen:

Das Verhalten des Pullacher Isarhangs in Bezug auf Großrutschungen und -abbrüche ist zweigeteilt. Im hangnah bebauten Nordteil von der Burg Schwaneck bis zum Kalkofenweg zeigen die Messeinrichtungen (Burg Schwaneck, Bürgerhaus, Habenschadenstraße 33-35) keine Anzeichen für aktive Verformungen oder Neuanbrüche, die bis in den neogenen Flinz hinein reichen. Die Bewegungsmessungen der Extensometer sind im Bereich < 1 mm / a und finden meist in den obersten Bodenschichten statt. Im südlichen Bereich dagegen zeigen die Messergebnisse (Grünwalder Brücke) mit ca. 2,5 mm/a deutlich aktive Bewegungen an. Jedoch ist zu beachten, dass die Ergebnisse nur von einem eng begrenzten Untersuchungsbereich rund

um die Grünwalder Brücke stammen und folglich nur eine geringe Aussagekraft für die Rutschschollen N‘ davon bis zum Kalkofenweg haben.

In den nachfolgenden zwei Kapiteln werden die Ergebnisse der Messungen an Konvergenzmessstrecken und Kluftspionen dargestellt. Die Ergebnisse gehen ebenfalls in die Bewertung der Aktivität und in die Probabilistik ein.

6.3.2 Ergebnisse der Kongvergenzmessungen

An den insgesamt vier installierten Messlinien wurden über 16 Monate (Habenschadenstraße 15) bzw. 12 Monate (Rabenwirt, Burgweg) die Bewegungen in den obersten Bodenschichten bis Ende April 2015 gemessen. Überwiegend ergaben alle Messungen Bewegungsraten von ≤ 1 mm/Monat. Eine tabellarische Auswertung der Messungen und eine graphische Darstellung der absoluten Bewegungen und Geschwindigkeiten finden sich in Anlage 2.

Der Messabschnitt 1 an der Konvergenzmessstrecke **Burgweg** (KVM 4/1), von der Konglomeratwand zum Messpunkt innerhalb des Hangschutts, zeigt eine konstante Dehnung von 8,1 mm. Die weiteren Messabschnitte bis zu einem großen Sturzblock (KVM 4/2) und von diesem zum nächsten Sturzblock am Hangfuß (KVM 4/3), zeigen jeweils eine Verkürzung der Messstrecke um 8,0 mm (KVM 4/2) und um 3,7 mm (KVM 4/3). Insgesamt verkürzte sich die ursprüngliche Strecke somit um ca. 3,7 mm.

Tab. 23: Absolute Bewegungen der einzelnen Messstrecken der Konvergenzmessstrecke Burgweg (KVM 4) sowie deren ursprüngliche Länge. Negative Werte = Verkürzung, positive Werte = Verlängerung der Messstrecke.

	Bewegung absolut	**Geschwindigkeit absolut**	**ursprüngl. Länge**
KVM 4/1	+ 8,1 mm	0,7 mm/Monat	8,7932 m
KVM 4/2	- 8,0 mm	0,7 mm/Monat	15,6119 m
KVM 4/3	- 3,7 mm	0,3 mm/Monat	8,0763 m
KVM 4	Σ - 3,8 mm	-	Σ 32,4814 m

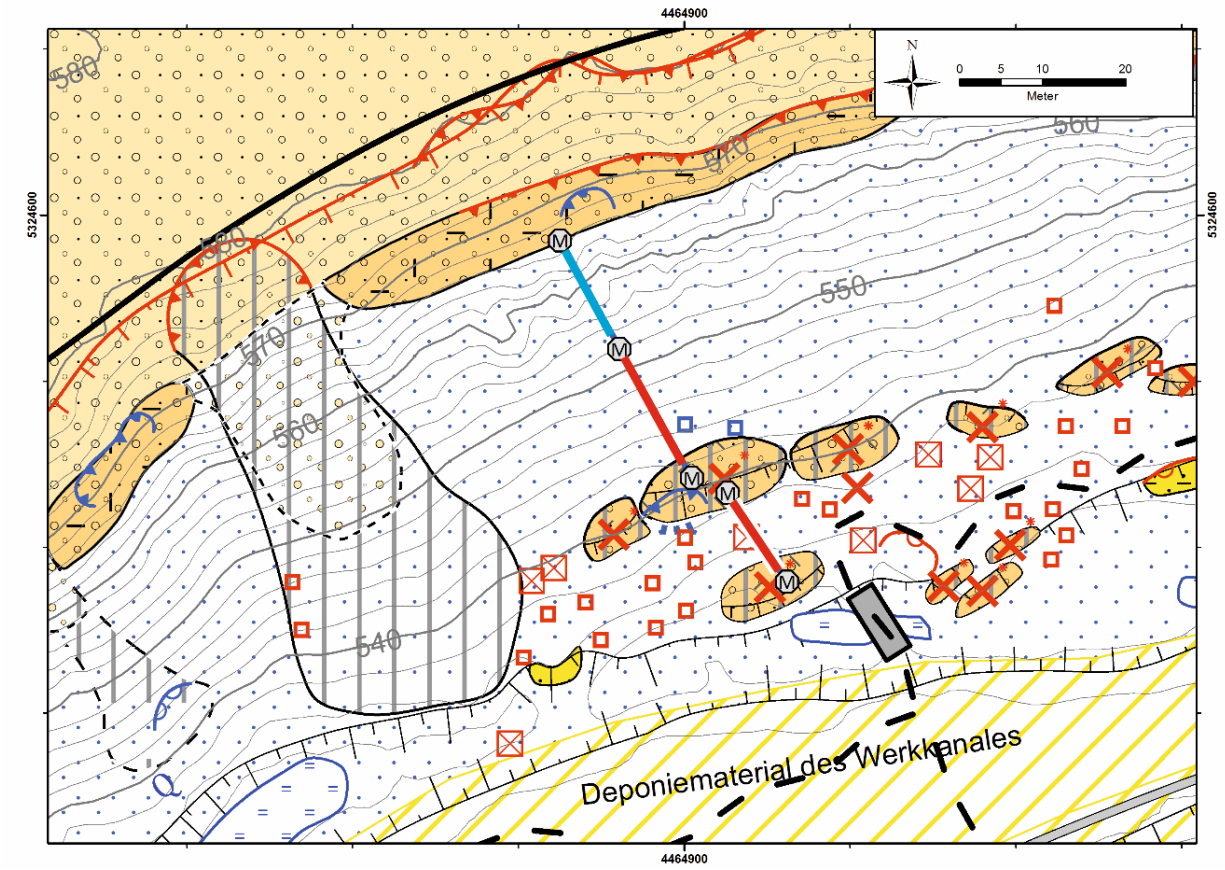


Abb. 40: Die Konvergenzmessstrecken Burgweg (KVM 4), vergrößert aus der Geologischen Karte mit absoluten Abstandsmessungen. Rot = Verkürzung, blau = Verlängerung der Messstrecke.

Am **Rabenwirt** (Kirchplatz 1) liegen zwei Messstrecken (KVM 2 + 3) mit einem Abstand von ca. 12 m parallel am Hang unterhalb der Restaurant-Terrassen. Die Messstrecke innerhalb der Rutschung zeigt im Messabschnitt 1 (KVM 2/1) eine Verkürzung von 6,9 mm. Im Zeitraum zwischen 21.5. bis 03.07.2014 wurden die höchsten Bewegungsraten dieser Messstrecke von ca. 1,4 mm/Monat gemessen. Der Messabschnitt 2 (KVM 2/2) weist eine Verlängerung innerhalb des Messzeitraumes (12 Monate) von insgesamt 24,9 mm auf. Es wurden bei 4 von 5 Messungen Bewegungsraten > 1 mm/Monat (max. 4,5 mm/Monat) registriert. Die Messstrecke hat sich insgesamt um 18,0 mm verlängert. Die 2. Messstrecke (KVM 3), nördlich anschließend, zeigt in Messabschnitt 1 eine Verlängerung von 9,2 mm (max. Bewegungsrate 4,2 mm/Monat). Der Messabschnitt 2 (KVM 3/2) hat sich innerhalb des Messzeitraums um 5,4 mm verkürzt, der Messabschnitt 3 (KVM 3/3) hat sich um 1,6 mm verlängert. Somit ergab sich einer Verlängerung der KVM 3 um 5,4 mm. Alle erwähnten Messwerte der beiden Messstrecken sind nochmals in Tab. 24 zusammengefasst.

Tab. 24: Absolute Bewegungen der einzelnen Messstrecken der Konvergenzmessstrecken am Rabenwirt (KVM 2+3) sowie deren ursprüngliche Länge. Negative Werte = Verkürzung, positive Werte = Verlängerung der Messstrecke.

	Bewegung absolut	Geschwindigkeit absolut	ursprüngl. Länge
KVM 2/1	- 6,9 mm	0,6 mm/Monat	9,4308 m
KVM 2/2	+ 24,9 mm	2,0 mm/Monat	8,2571 m
KVM 2	**Σ** + 18,0 mm	-	Σ 17,6879 m
KVM 3/1	+ 9,2 mm	0,7 mm/Monat	5,9165 m
KVM 3/2	- 5,4 mm	0,4 mm/Monat	11,5915 m
KVM 3/3	+ 1,6 mm	0,1 mm/Monat	5,3437 m
KVM 3	**Σ** + 5,4 mm	-	Σ 22,8517 m

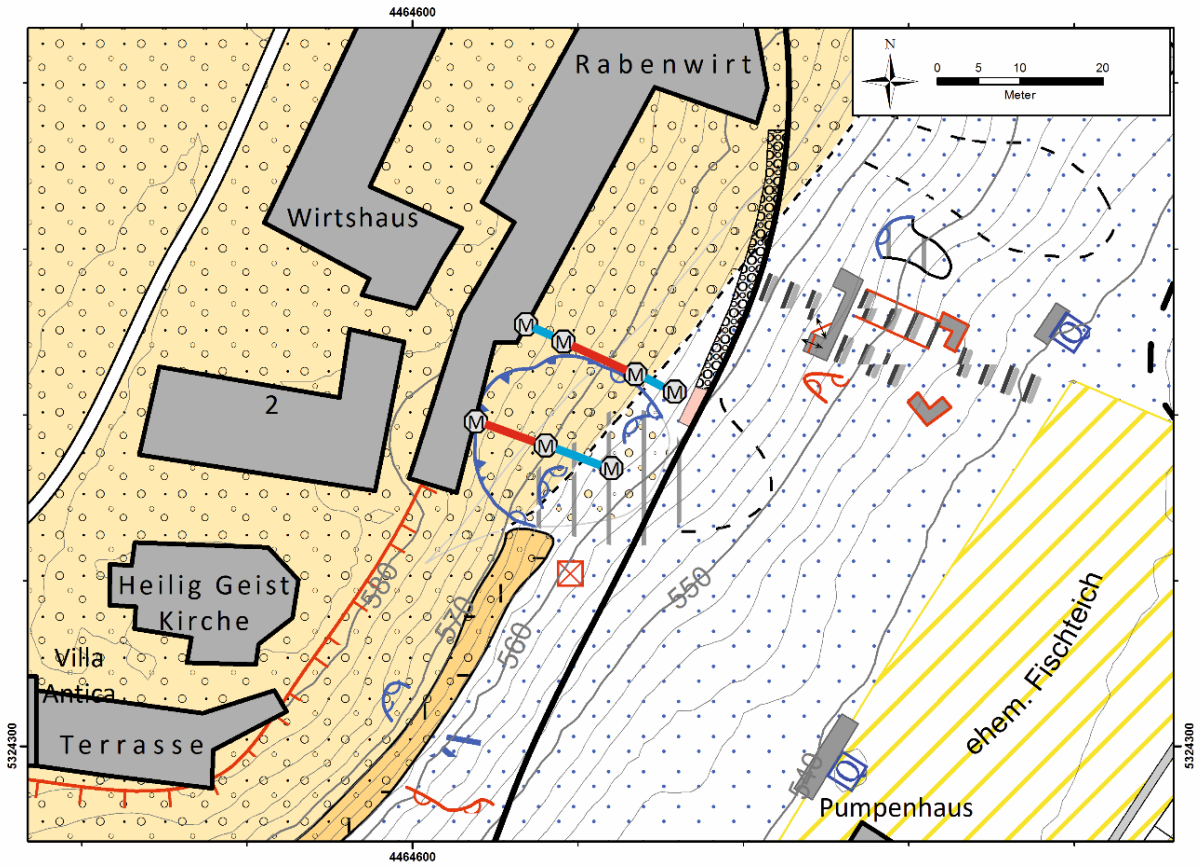


Abb. 41: Die Konvergenzmessstrecken am Rabenwirt / Kirchplatz 1 (KVM 2 + 3), vergrößert aus der Geologischen Karte mit absoluten Abstandsmessungen. Rot = Verkürzung, blau = Verlängerung der Messstrecke.

Im ersten Abschnitt der Messstrecke **Habenschadenstraße 15** (KVM 1/1) wurde innerhalb des Messzeitraumes eine Sicherung der Gartenterrassen mittels Erdnägeln und Spritzbeton eingebaut, weshalb die Messungen am 11.03.2014 und 28.03.2014 in diesem Bereich nicht

durchgeführt werden konnten. Die Folgemessung am 21.05.2014 war eine Nullmessung, die über einen Korrekturwert in der Auswertung mit dem Messergebnis der letzten Messung gleichgesetzt wurde. Insgesamt wurden zwischen den Terrassenmauern weder vor noch nach Einbau der Sicherungen nennenswerte Deformationen gemessen (Verkürzung um 0,5 mm in 16 Monaten). Auch der Messabschnitt 2 (KVM 1/2) war von den Baumaßnahmen betroffen, weshalb eine Nullmessung am 11.03.2014 erfolgte, die anschließend in der Auswertung mittels Korrekturwert mit der vorherigen Messung (13.02.2014) gleichgesetzt wurde. Die Strecke verlängerte sich um 7,9 mm mit einer maximalen Bewegungsrate von 1,7 mm/Monat. Der Messabschnitt 3 (KVM 1/3), der bis zur ca. 1 bis 2 m mächtigen Konglomeratwand reicht, verkürzte sich um 13,0 mm und zeigt bei fünf von neun Messungen eine Bewegungsrate > 1 mm/Monat (max. 1,7 mm/Monat). Somit ergibt sich eine Verkürzung der Messstrecke im Oberhang (Hangkante/Bebauung bis Konglomeratwand) um 4,3 mm. Die KVM 1/10 verläuft schräg im Oberhang zwischen den Terrassen der Habenschadenstraße 17 und dem Fixpunkt (Holzpflock) zwischen KVM 1/2 und 1/3. Die Messergebnisse zeigen heterogene Bewegungsraten, fünf von acht Messungen zeigen Geschwindigkeiten > 1 mm/Monat, die insgesamt eine Verlängerung von 4,4 mm ergeben. Zwischenzeitlich wurden im Herbst 2014 sogar Dehnungen von 7,2 mm gemessen.

Die unterhalb der Konglomeratwand anschließenden Konvergenzmessabschnitte KVM 1/4 und KVM 1/5 zeigen Dehnungen von 0,8 mm (KVM 1/4) und 3,7 mm (KVM 1/5). Im Falle der KVM 1/5 entwickeln sich diese konstant über den Beobachtungszeitraum. Eine Betrachtung der KVM 1/4 und 1/5 zusammen ergibt im Hangbereich unterhalb der Konglomeratwand eine Dehnung von ca. 4,5 mm. Die Messstrecke KVM 1/6, die bis an einen großen Baum am Hangfuß reicht, verkürzte sich um 7,8 mm mit einer maximalen Verschiebungsrate von 1,5 mm/Monat (Messung 03.07.2014). Die am flach auslaufenden Hangfuß anschließenden Messabschnitte KVM 1/7 und 1/8 zeigten keine signifikanten Bewegungen, lediglich Dehnungen im Bereich von 0,2 mm (KVM 1/7) und 1,0 mm (KVM 1/8). Der abschließende Messabschnitt (KVM 1/9) weist eine Verkürzung von 2,1 mm auf, wobei die Bewegungsraten im Messzeitraum keinen eindeutigen Trend zu einer konstanten Verkürzung zeigen. Wird der Hangbereich unterhalb der Konglomeratwand betrachtet, ergibt sich eine Verkürzung um insgesamt 4,2 mm. Alle absoluten Bewegungen, absoluten Geschwindigkeiten und Längen der KVM 1 sind nochmals in Tab. 25 zusammengefasst.

Tab. 25: Absolute Bewegungen der einzelnen Messstrecken der Konvergenzmessstrecke Habenschadenstraße 15 (KVM 1) sowie deren ursprüngliche Länge. Negative Werte = Verkürzung, positive Werte = Verlängerung der Messstrecke.

	Bewegung absolut	Geschwindigkeit absolut	ursprüngl. Länge
KVM 1/1	- 0,5 mm	-	2,3700 m
KVM 1/2	+7,9 mm	0,5 mm/Monat	6,8387 m
KVM 1/3	- 13,0 mm	0,8 mm/Monat	10,6526 m
KVM 1/4	+ 0,8 mm	-	14,5339 m
KVM 1/5	+ 3,7 mm	0,2 mm/Monat	10,4267 m
KVM 1/6	- 7,8 mm	0,5 mm/Monat	11,4694 m
KVM 1/7	+ 0,2 mm	-	11,8288 m
KVM 1/8	+ 1,0 mm	0,1 mm/Monat	8,7807 m
KVM 1/9	- 2,1 mm	0,1 mm/Monat	20,3685 m
KVM 1/10*	+ 4,4 mm	0,3 mm/Monat	10,3913 m
KVM 1	Σ – 5,4 mm	-	Σ 107,6606 m

*: KVM 1/10 verläuft schräg zum Hang

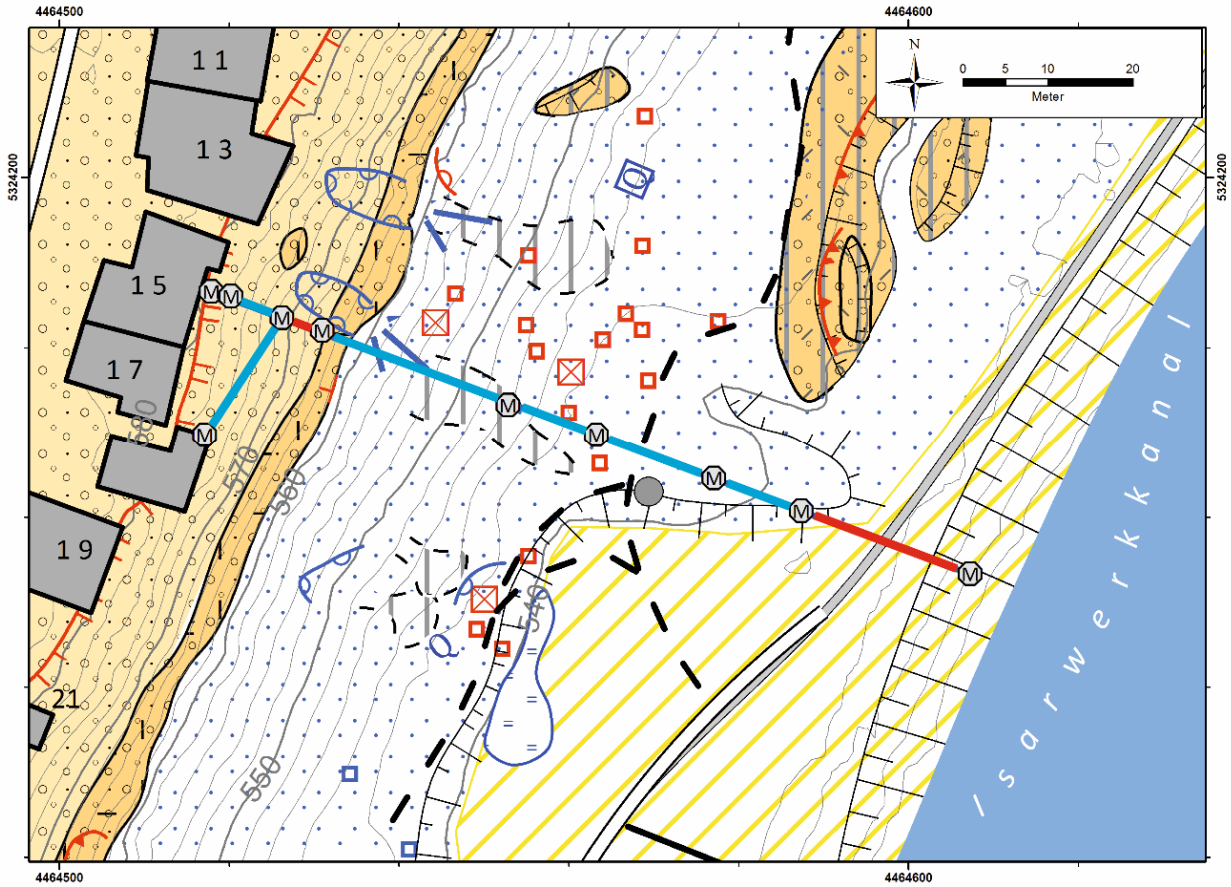


Abb. 42: Die Konvergenzmessstrecken Habenschadenstraße 15, vergrößert aus der Geologischen Karte mit absoluten Abstandsmessungen. Rot = Verkürzung, blau = Verlängerung der Messstrecke.

6.3.3 Ergebnisse der Kluftspione

Es wurden von BBB an zwei Standorten Mauer- bzw. Kluftspione installiert und seit 2005 (Treppenweg) bzw. 2013 (Habenschadenstraße 15/17) in unregelmäßigen Abständen gemessen. Dabei ergaben sich am Treppenweg, für die überwachten Klüfte innerhalb des Konglomerates in den 8 Jahren (bis Juni 2013) maximale Bewegungen von <<0,5 mm. Nicht alle Messpunkte blieben bis zuletzt erhalten, es zeigen jedoch alle Messungen eine sehr geringe bis keine Bewegungen an den 2005 als möglicherweise gefährdend eingestuften Klüften. Die Kluftspione an den Terrassen der Habenschadenstraße 15 und 17 zeigen im Beobachtungszeitraum (Juni 2013 bis April 2015) bei den Messstrecken, die parallel zur Hangkante verlaufen (P 1, P 3, P 4), Dehnungen von maximal 2,2 mm. Bei der parallel zum Hang liegenden Messstrecke P 3 wurden Dehnungen von 5,0 mm gemessen.

Tab. 26: Ergebnisse der Kluftspion-Messungen an den Terrassen der Habenschadenstraße 15 und 17.

Datum	**P 1**	**P 2**	**P 3**	**P 4**
	absolute Bewegungen [mm]			
07.06.2013 (Nullmessung)	8,700 cm	11,990 cm	9,000 cm	11,940 cm
12.06.2013	+ 0,15	+ 3,94	+ 0,45	+ 0,3
20.06.2013	+ 0,25	+ 3,7	+ 0,53	- 0,57
24.06.2013	+ 0,20	+ 5,65	+ 0,63	+ 0,82
28.06.2013	+ 0,25	+ 4,03	+ 0,57	+ 0,60
17.12.2013	+ 0,23	+ 3,29	+ 1,06	+ 2,08
02.09.2014	aufgegeben	+ 3,60	+ 1,43	+ 2,48
22.04.2015	aufgegeben	+ 4,96	+ 1,74	+ 2,19

Tab. 27: Ergebnisse der Kluftspion-Messungen an den Nagelfluhwänden am Treppenweg.

Stand Juni 2013			Messstrecken:		[in cm]	
Datum	Wetter	Temp.	M1	M2	M3	M5
24.05.2005	Regen	15°	7,763	10,117	8,949	-
25.05.2005	Sonne	20°	7,759	10,092	8,956	15,433
08.06.2005	bedeckt	15°	7,762	10,123	8,975	15,445
24.08.2005	heiter, nach mehrtägigem Starkregen	15°	7,763	10,118	8,943	15,449
06.05.2008	Sonne	17°	Nicht zugänglich	Nicht zugänglich	8,941	15,458
06.06.2013	Sonne, nach mehrtägigem Starkregen	20°	7,763	10,135	kaputt	
20.06.2013	Sonne	36°		10,132	kaputt	15,427

Die Messungen in der Nagelfluh zeigen, dass im Bereich des Treppenwegs zwar immer wieder Hanganbrüche (Abrutschen von Lockermassen) auftreten, die im Hang befindlichen Konglomerate, die bis zur Bebauung an der oberen Hangkante reichen, sich jedoch als stabil erweisen. Die Klüfte zeigen bisher keinerlei Bewegungen an.

Die Kluftspione an den Fundamenten / Terrassen im Bereich des Schadensereignisses Habenschadenstraße 15/17 dagegen ließen immerhin bis zu 5 mm Deformation erkennen, die jedoch ebenfalls abklingen.

6.4 Ergebnisse der Electrical Resistivity Tomography

Kommentar: Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Zwischenberichts war ein Profil geoelektrisch vermessen (Messprofil „Josef-Breher-Weg“). Weitere Messprofile sowie ergänzende Sondierungen an ausgewählten Stellen sollen helfen, die Ergebnisse zu verifizieren / falsifizieren und eine Bewertung der Hangstabilität vorzunehmen (siehe Angebot A15-083).

6.5 Geotechnische Modellierungen

Im Folgenden Kapitel sollen zwei repräsentative geologische Szenarien (A und B) statisch untersucht werden:

- Szenario A: ***Hangkante ohne bestehende Rutsch-/Bruchkörper;*** mit Differenzierung oberflächlicher Hanganbrüche und Großrutschungen
- Szenario B: ***Hangkante mit basalen alten Rutschschollen,*** mit Differenzierung oberflächlicher Hanganbrüche und Großrutschungen

Kommentar: Im Rahmen dieses Zwischenberichts wird zunächst auf Szenario A eingegangen. Diese Betrachtungen basieren auf den Berechnungen im Rahmen der Masterarbeit von D. Davies, die an der TU München mit der Software SLIDE 2D 6.0 durchgeführt wurden. Die Betrachtung von bereits durch Bruchmechanismen beeinträchtigter Hangkanten (Szenario B) kann sinnvollerweise erst nach einer Auswertung zusätzlicher Erkundungen erfolgen. Die Ergebnisse früherer und aktueller Modellierungen diverser Projekte sollen in diesem Zug ebenfalls mit eingearbeitet werden.

6.5.1 Baugrundmodelle und repräsentative Querschnitte

Das hier untersuchte Baugrundmodell ist eine Zusammenstellung der in den Kapiteln 4 und 5.7 angeführten Untersuchungen sowie eigener Beobachtungen und Interpretationen. So zeigen die Ergebnisse diverser Erkundungsbohrungen (z.B. Bürgerhaus NMB 1, Habenschadenstraße 13) zeigen, dass die zu Nagelfluh verfestigten Schichtbereiche von unregelmäßig verbackenen Schottern/Kiesen überlagert werden, die aufgrund dieser lokalen bzw. beginnenden Lithifizierung geotechnische Eigenschaften besitzen, die sich deutlich von den oberflächennahen Niederterrassenschottern unterscheiden. Auf Grundlage dieser Beobachtungen wurden im geologischen Profil zwei Arten von Schottern über der Naglefluh verzeichnet. Die angedeutete Grenze stellen jedoch keine stratigraphischen Einheiten wie Hoch- zu Niederterrasse dar, sondern den vermuteten Verlauf geotechnischer Homogenbereiche.

Die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen müssen später noch berücksichtigt und in die Modellierungen übernommen werden. Das Untergrundmodell bzw. das Profil wird exemplarisch für das gesamte Projektgebiet für die Standsicherheitsberechnungen der Hanganbrüche wie auch möglicher Rotations- Translationsrutschungen verwendet.

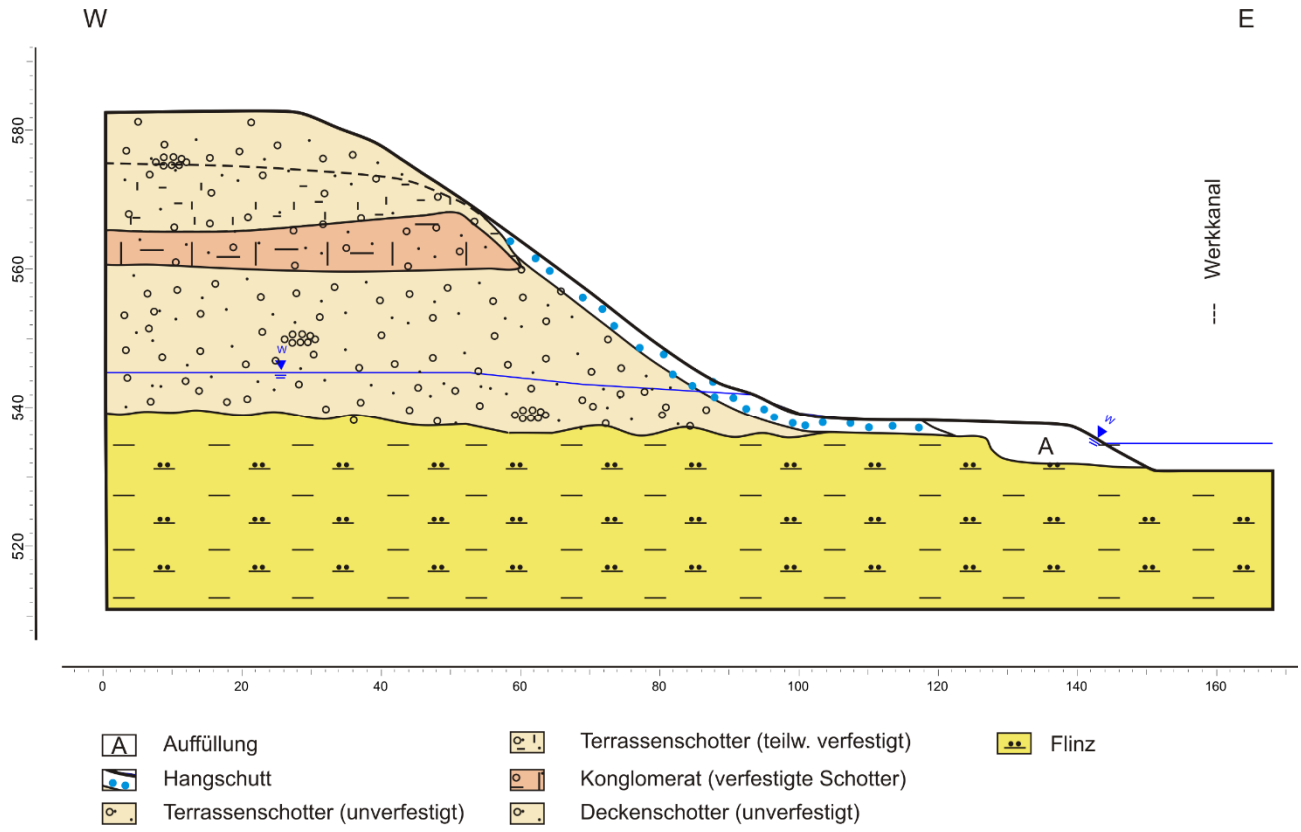


Abb. 43: Exemplarisches geologisches Profil des Pullacher Untergrundes.

Aus diesen Vorgaben heraus wurde ein Profilschnitt ca. 10 m nördlich der Rutschung am Rabenwirt von 2013 gewählt: Hier liegen viele Daten aus Bohrungen und Sondierungen vor und

das Konglomerat ist nicht an der GOK anstehend, sodass wie im Jahr 2013 auch Hanganbrüche über den gesamten Hang möglich und modellierbar sind.

Als charakteristische geotechnische Parameter für diese ersten Standsicherheitsberechnungen wurden folgende Kennwerte aus den bestehenden Literaturdaten abgeleitet. Diese wurden zudem durch eigene Erfahrungswerte gewichtet und mit bodenmechanischer Ergebnissen dieser Studie ergänzt.

Tab. 28: Bodenparameter für die Standsicherheitsanalysen am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TUM.

	Reibungswinkel φ' [°]	**Kohäsion c [kN/m²]**	**Wichte γ / γ' [kN/m³]**
Generalisiertes Baugrundmodell			
Hangschutt	33	10	19/18
Terrassenschotter	25	3	18*/10
Schotter - teilweise verfestigt	35	20	20/15
Nagelfluh	40	400	21/20
Deckenschotter	35	5	21*/14
Flinz	20	50	22/20

* bestimmt durch Dichtebestimmung

Die Formblätter für die Dichtebestimmung sowie die Auswertung der Siebanalyse sind in Anlage 4 beigefügt. Die in situ Untersuchungen ergaben für die Hochterrassenschotter (saCGr) eine Dichte von ρ = 2,16 g/cm³ und für die Niederterrassenschotter (sisaGr) eine durchschnittliche Dichte von ρ = 1,86 g/cm³.

Kommentar: Die oben angegebenen Parameter sind als Entwurf zu betrachten und werden in der abschließenden Berichtsversion diskutiert und aktualisiert. Ebenso kann eine Rückrechnung abgelaufener Ereignisse und somit Justierung von Kennwertsätzen erfolgen.

6.5.2 Exemplarische Standsicherheitsanalysen

Bei der Berechnung der Standsicherheiten wurden jeweils zwei verschiedene Berechnungsverfahren (Janbu und Bishop) und unterschiedliche Gleitkreise vorgegeben (siehe Kap. 2.7). Im Folgenden werden die Ergebnisse der präsentiert und diskutiert.

Für die **oberflächennahen Hanganbrüche** ergibt sich aus den Berechnungen ein FoS (Factor of Safety) von 1,01 nach Janbu und 1,06 nach Bishop). Der Hang befindet sich somit in Bezug auf oberflächennahe Lockergesteinsrutschungen im Grenzgleichgewicht. Nach diesen Berechnungen können kleinste Zusatzbelastungen ein Abrutschen der oberen Bodenmeter bewirken. Die Bereiche mit dem tiefsten Eingriff der Gleitkreise in den Untergrund liegen erwartungsgemäß in den locker gelagerten Gesteinen ober- (Terrassenschotter) und unterhalb (Hangschutt) des

Konglomerats. Nach den Berechnungen würden die Rutschungen eine maximale Tiefe der Gleitbahn von 4 bis 7 m erreichen, was nach den Erkenntnissen aus der Kartierung sehr unwahrscheinlich ist. Erwartungsgemäß würden Inhomogenitäten oder Lagen mit höheren Festigkeit ein derartiges Eindringen in die Schotter verhindern. Aufgrund der niedrigeren Bodenkennwerte der Terrassenschotter im Vergleich zum Hangschutt liegen die Gleitkreise mit den niedrigsten FoS oberhalb des Konglomerats. Da es sich bei den möglichen Gleitkreisen um relativ kurze Kreissegmente mit einer geringen Mächtigkeit der möglichen Rutschmassen handelt, wirkt sich der Unterschied in der Berechnung zwischen Janbu und Bishop nur minimal mit einer Differenz von 0,05 aus. Eine Gewichtung der Berechnungen nach Janbu und Bishop ist in diesem nicht nötig. In der Regel wird für kreisförmige Gleitflächen die Berechnung nach Bishop bevorzugt, da diese mit Momentengleichgewichten rechnet. Ein Vergleich zwischen den für Hanganbrüche gewählten Gleitkreisen (circular grid search) und für Rotations-Translationsrutschungen (non-circular path search) ergibt sich aus Abb. 44 links. Dort sind neben den oberflächennahen Gleitkreisen auch Gleitkreise berechnet, welche mit einem FoS = 1,48 ähnlich wie die zu erwartenden Gleitbahnen für eine Rotations- Translationsrutschung verlaufen. Sie setzen deutlich weiter hinter der Hangkante an, verlaufen durch das Konglomerat hindurch und liegen mit ihrem tiefsten Punkt innerhalb des Flinz bevor sie wieder rotationsförmig an die GOK kommen. Für diese Gleitbahnen ergibt sich nach Janbu mit der „circular grid search"-Methode ein FoS = 1,48.

Für die Berechnungen der Standsicherheit der **Rotations-Translationsrutschungen** mit dem non-circular path search Gleitkreisen ergibt sich ein FoS für die Berechnung nach Janbu von 1,38 und nach Bishop von 1,45. Beide Ergebnisse liegen außerhalb des Grenzgleichgewichtes, das meist bis zu einem FoS von 1,2 angenommen wird. Die Hänge sind unter den vorgegebenen Untergrundbedingungen stabil. Bei der Berechnung von nicht kreisförmigen Gleitkreisen sollte der Theorie nach das Lamellenverfahren nach Janbu bessere Werte liefern, jedoch sind auch hier die Unterschiede zu dem Verfahren nach Bishop so gering, dass die Berechnungen sich wie bereits für die Hanganbrüche gegenseitig bestätigen. Ein größeren Unterschied hingegen gibt es zwischen den Berechnungen nach Janbu, einmal mit kreisförmiger Gleitbahn (FoS = 1,48) und nicht kreisförmiger Gleitbahn (FoS = 1,38). Diese Differenz bestätigt die Wahl einer non-circular Gleitbahn für die tiefgreifenden Rutschungen, da mit ihr eine in sich stimmige Gleitbahn sowie ein geringerer FoS errechnet wird.

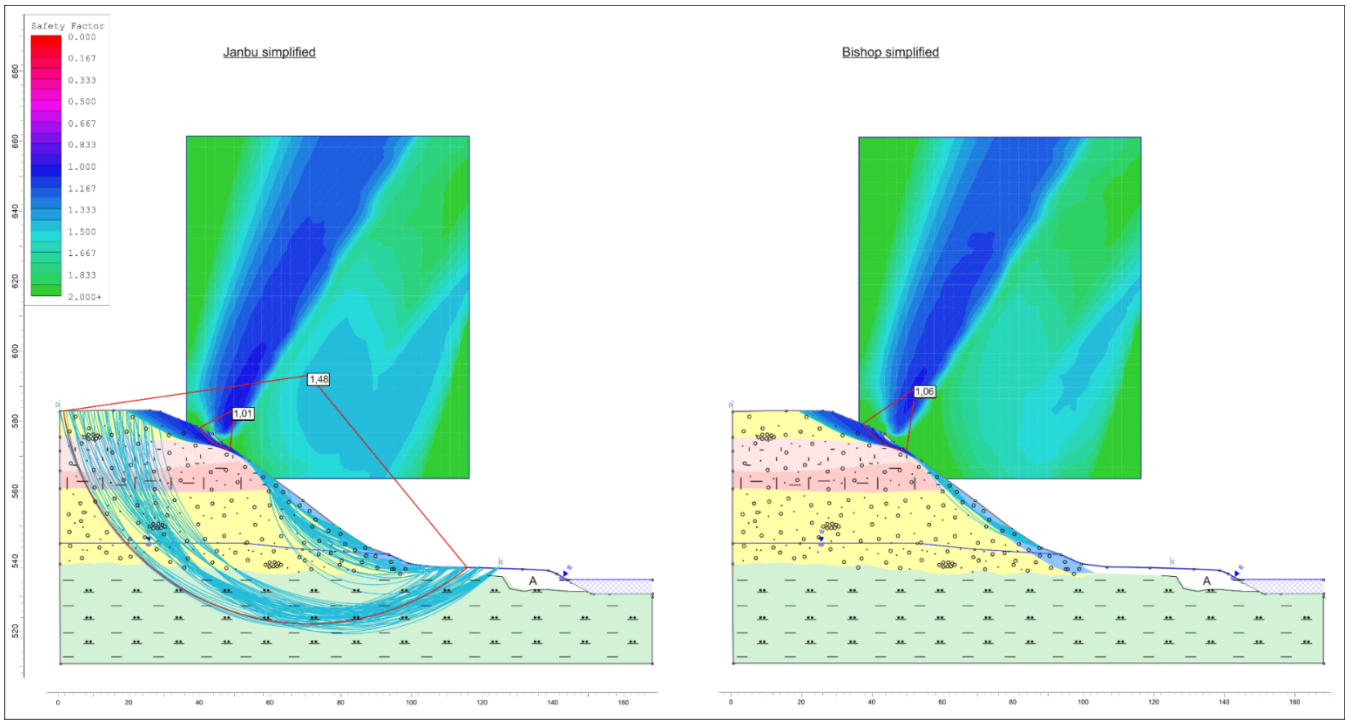


*Abb. 44: Berechnung des Sicherheitsbeiwertes (FoS nach Janbu = 1,01; FoS nach Bishop = 1,06) für ein Versagen des Hanges mit einer Bruchmechanik wie bei **Hanganbrüchen**. Dargestellt sind alle Gleitbahnen mit einem FoS < 1,5. Die Berechnung nach Janbu zeigt folglich auch Gleitkreise, die im Bereich der Rotations-Translationsrutschungen mit einem FoS = 1,48 liegen.*

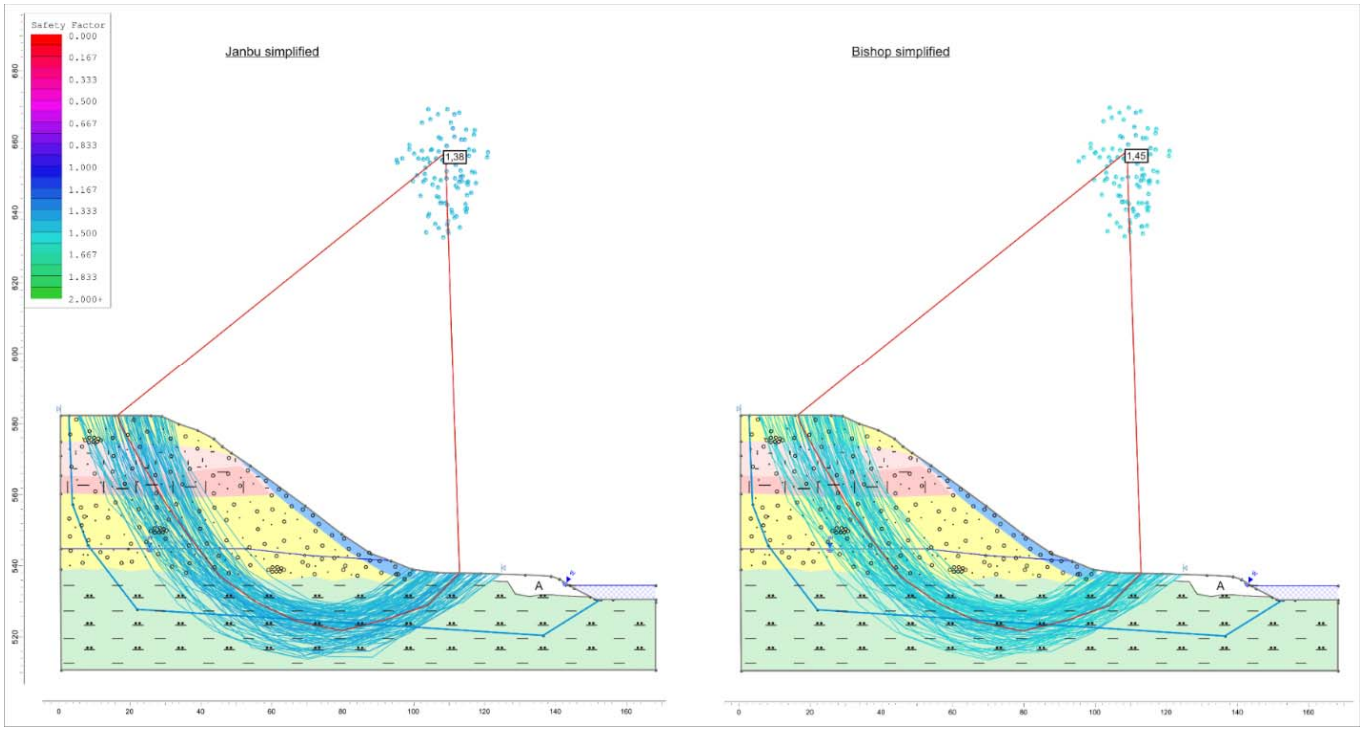


*Abb. 45: Berechnung des Sicherheitsbeiwertes (FoS nach Janbu = 1,38; FoS nach Bishop = 1,45) für ein Versagen des Hanges mit einer Bruchmechanik wie bei **Rotations-Translationsrutschungen**. Die dicke blaue Linie ist eine zuvor definierte mögliche Gleitbahn. Dargestellt sind die 100 Gleitkreise mit dem niedrigsten FoS.*

6.6 Erstellung des Gefahren-Atlas Hangbewegung

6.6.1 Funktionsweise

Im Anschluss an die qualitative Erfassung der Hangbewegungs-Gefährdungen im Pullacher Raum in den vorangegangenen Kapiteln sollen im Folgenden – als Ziel des vorliegenden „Gefahren-Atlas“ – Quantifizierungen und regionale Differenzierungen in Gefahrenkarten für die verschiedenen Hangbewegungsprozesse / Schadensbilder (z.B. großer Felssturz) umgesetzt werden. Diese Gefahrenkarten sind i.Pr. ähnlich zu werten wie die vom LfU publizierten sogenannten Gefahren-Hinweiskarten. Im Gegensatz zu diesen jedoch liegt bei den gegenständlichen Gefahrenkarten bereits eine höhere Datendichte vor.

Moderne regionale Gefahren-, Gefährdungs- oder Risikoanalysen für Massenbewegungen beinhalten ein komplexes Gefüge an Arbeitsschritten, die v.a. durch die Verwendung von Geoinformationssystemen erleichtert werden. Die Nomenklatur ist dabei leider uneinheitlich. Das LfU führt regionale Studien z.B. zur Felssturzgefährdung für den bayerischen Alpenraum im Rahmen von EU-Projekten aus. Die vorliegende Arbeit orientiert sich i.W. an der dort gewählten Systematik. Detaillierte Erläuterungen zur Theorie von Gefährdungsanalysen und praktischer Anwendung in verschiedenen Regionen Deutschlands und Nachbarländern werden in [U 39] gegeben.

An erster Stelle des Bearbeitungsprozesses steht die regionale Ermittlung homogener Anbruch- oder Erosionsgebiete, die Berechnung oder empirische Ermittlung von Reichweiten und schließlich die Ausweisung potentieller Ablagerungsbereiche, also Geländebereiche, die betroffen sein können. In einem weiteren Schritt werden die Ablagerungsbereiche der so erstellten **Gefahren-Hinweiskarten** (danger maps) über Gelände- und Recherchebefunde im Hinblick auf Eintretenswahrscheinlichkeit und Intensität bewertet. Das Resultat ist schließlich eine **Gefahrenkarte** (hazard map). Vereinfachend gesprochen müssen in diesem Verfahren die drei Größen: Reichweite, Eintretenswahrscheinlichkeit und Intensität potentieller Ereignisse ermittelt werden. Es sei hier nochmals betont, dass die Gefährdung einen physikalischen Prozess im Rahmen der natürlichen Gegebenheiten beschreibt, nicht jedoch Auswirkungen und Risiko. Diese sind in späteren Schritten durch Gemeinde und Entscheidungsträger zu definieren.

Die aufwändigen Methoden zur Reichweitenermittlung sind bereits konkret und praktisch anwendbar (GIS). Die nicht weniger komplexen Ansätze zur Probabilistik dagegen sind sehr unterschiedlich. In der Regel werden Wiederkehrfrequenzen angegeben. In der gegenständlichen Studie dagegen werden die Wahrscheinlichkeiten relativiert anhand von Geländebefunden, die auf Ereignisse schließen lassen (Aktivität, Disposition, Auslösefaktoren). Intensitäten wiederum lassen sich durch Volumenbestimmungen hinreichend erfassen und finden sich im Grunde auch schon in der 4-Gliederung der Prozesse wieder (Gefährdungsbilder A bis D). Diese Punkte werden in den entsprechenden Kapiteln nochmals aufgegriffen.

Die Kombination von Intensitätsstufen und Wahrscheinlichkeitsgraden zur Bewertung der gefährdeten Ablagerungsbereiche wird oftmals in Matrixmodellen durchgeführt [U 39] wie auch in Kap. 6.6.4.

Der Prozess der Gefährdungsanalyse für den Gefahren-Atlas Pullach kann wie in folgendem Diagramm zusammengefasst werden.

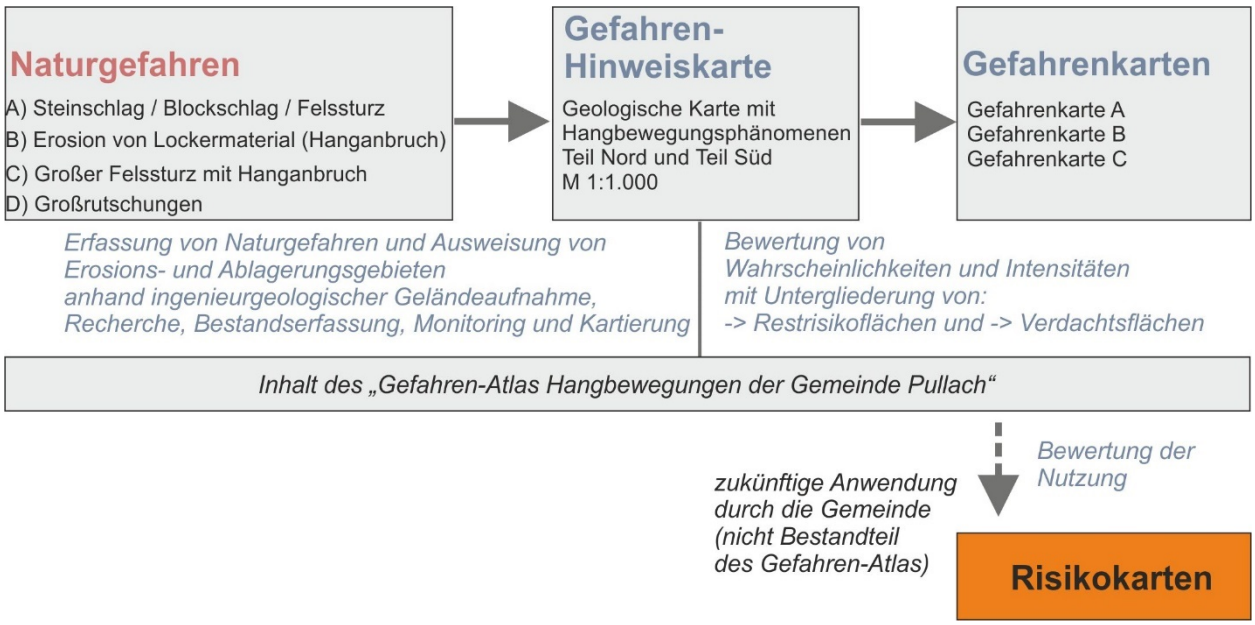


Abb. 46: Darstellung der Arbeitsschritte und des Leistungsumfangs des „Gefahren-Atlas Hangbewegungen“: Von der lokalen Erkennung von Naturgefahren, deren regionaler Erfassung bis hin zur Gefahrenkarte.

6.6.2 Spezifikationen und Begriffe

Die spezifische regionale ingenieurgeologische Situation des Pullacher Isarhangs bedingt, dass im Zuge der einzelnen Arbeitsschritte Anpassungen im Prozess der Gefahren-Ermittlung ausgeführt / berücksichtigt werden müssen:

Art der Massenbewegungen und Intensitäten

Intensitäten richten sich i.W. nach Volumina der bewegten Massen. Eine Grobgliederung ist bereits durch die definierten Gefährdungsbilder A bis D vorgegeben. Speziell für den Sturzprozess wird im Detail wie folgt gegliedert.

Tab. 29: Begriffsdefinition und Volumenangaben zu Sturzmassen.

	Intensität				
Volumen	**Großer Felssturz**	**Felssturz**	**Großer Blocksturz**	**Kleiner Blocksturz**	**Steinschlag**
Definition	Fels-Vol. > 100 m^3	Fels-Vol. 10 bis 100 m^3	Fels-Vol. 5 bis 10 m^3	Felssturz oder Blockschlag (> 300 mm) Vol. bis max. 5 m^3	Ein oder wenige Einzelsteine (< 300 mm)

Diese Nomenklatur weicht deutlich von der international üblichen Systematik ab, in der z.B. Felsstürze mit wenigen 100m³ noch als „klein“ klassifiziert werden. Für den eng bebauten Pullacher Raum dagegen muss dies bereits als ein „Großereignis“ betrachtet werden.

Ablagerungsgebiete und Reichweiten von Sturzprozessen (A, C)

Für die Ausweisung von Ablagerungsgebieten bzw. Reichweiten sind neben der Hangneigung die Reibungs- und Dämpfungseigenschaften des Untergrundes kritisch. Diese beschreiben die Brems- und Einfangwirkung und bemessen sich an drei Faktoren:

Dämpfungswert des unteren Isarhangs: Der Untergrund setzt sich aus Schuttmassen (z.B. Schwemmfächer, Schuttfuß…) zusammen. Im Gegensatz zu einem felsigen Untergrund sind also sehr geringe Steifigkeiten anzunehmen, was einen hohen Dämpfungsfaktor durch Eigenverformung des Untergrunds bedingt. Ein Großteil der Energie eines einschlagenden Blocks oder einer Felsmasse wird bereits vernichtet, der Rückprall ist gering.

Rauhigkeitswert der Oberfläche im Unterhang: Das Relief unterhalb der Nagelfluh ist i.d.R. zunächst relativ eben, um am Fuß des Hangs aufgrund alter Rutsch- oder Sturzschollen stark ausgeprägt zu werden. Dort bewirkt die hohe Rauigkeit ein starkes Abbremsen / Einfangen rutschender oder rollender Felsblöcke. Dieser Reibungseffekt verringert die absoluten Reichweiten.

Wirkung der Walddämpfung: Das Ablagerungsgebiet ist weitgehend bewaldet. Wald hat eine stark filternde Wirkung, große Teile des Gesteinsschutts bleibt an Bäumen hängen.

Generell kann also von einer hohen Dämpfung ausgegangen werden. Die Ablagerungsgebiete werden daher in den Karten entweder entsprechend dem Vorkommen von Nackentälchen talwärts eingegrenzt oder aufgrund der tatsächlich beobachtbaren Reichweite von Sturzblöcken bestimmt.

Ablagerungsgebiete und Reichweiten von Rutschungen (B)

Die Transportweiten und Ablagerungsgebiete von Hanganbrüchen sind i.d.R. eher gering. Hier erfolgt in der Gefahrenkarte (B) eine semiquantitative Einschätzung basierend auf unseren Erfahrungswerten. Der Grund für die Markierung relativ großer Flächen auf der Gefahrenkarte B liegt darin begründet, dass sich Hanganbrüche verschiedener Dimension in verschiedenen Bereichen des Ober- und Unterhangs lösen können und diese zusammengefasst werden.

Kommentar: Die Darstellung von Gefahrenzonen/Verdachtsflächen in den verschiedenen Gefahrenkarten ***umfasst sowohl die Ablagerungsgebiete als auch die Erosions-/Anbruchgebiete***. Eine Trennung wird in diesem Projektstadium nicht

vorgenommen. Beide Zonen weisen oft Überschneidungen auf, speziell bei Hanganbrüchen, und sind als potentiell „gefährdend“ für spätere Risikobetrachtungen anzusehen.

Probabilistik von Steinschlägen, Blockstürzen und Felsstürzen (A, C)

Die im Rahmen dieser Untersuchungen erstellten probabilistischen Einstufungen werden auf ein Minimum reduziert. Dabei wird prozessabhängig differenziert, was aufgrund der quantitativ unterschiedlichen Datenbasis zwingend ist (siehe Bestandsaufnahme der vorhergehenden Kapitel). Für Sturzprozesse werden die in dem Flussdiagramm genannten Kriterien in Karte und Bestandsdaten geprüft und mit fachtechnischer Erfahrung gewertet. Gemäß dem einfachen Auswertschema werden den identifizierten Flächen Gefährdungsgrade zugewiesen. Hierbei werden auch ergänzende Daten (aus messtechnischer Überwachung, Zeugen, Frequenzanalyse…) berücksichtigt. Der theoretische Hintergrund wird in [U 39] ausführlich dargelegt.

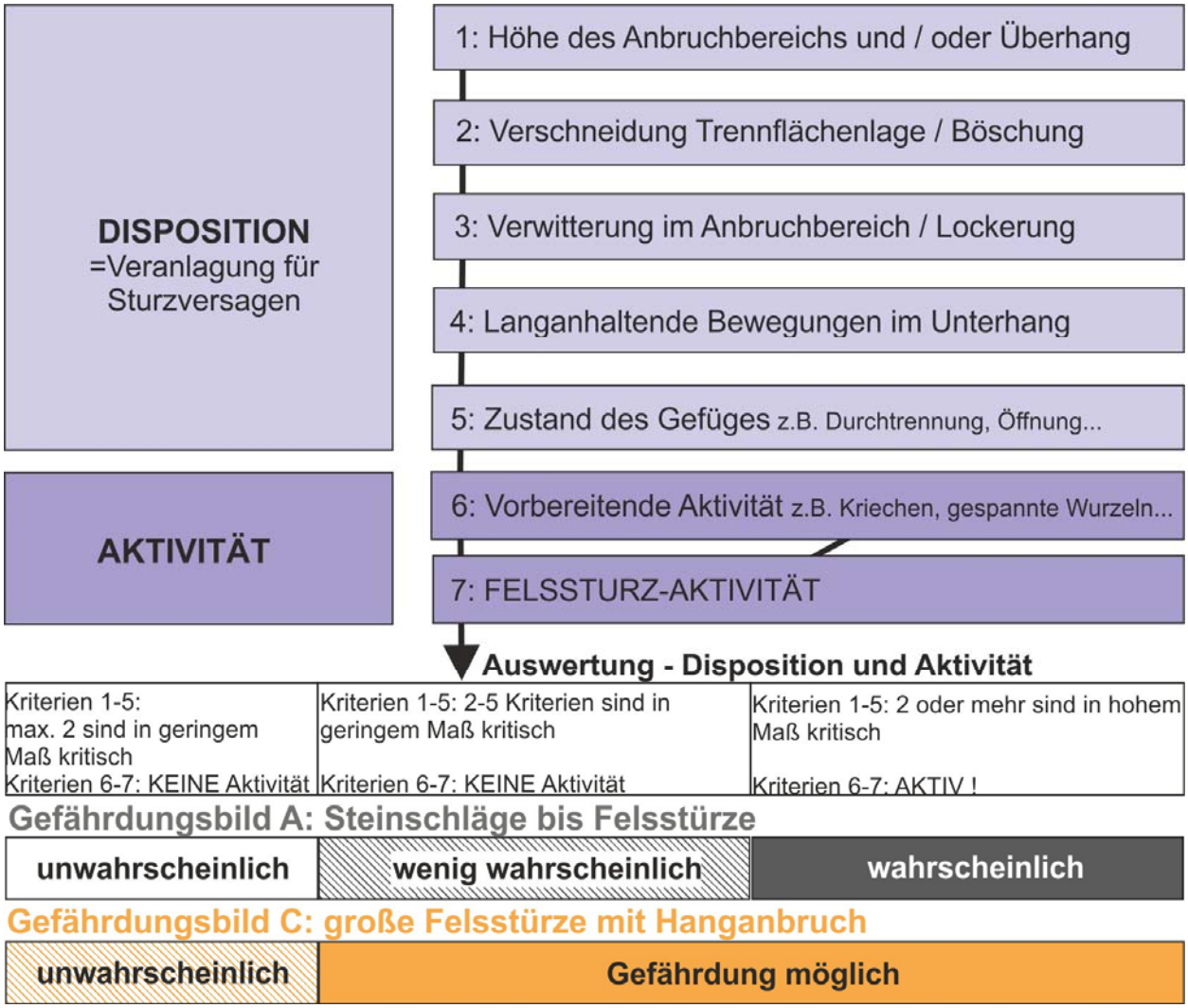


Abb. 47: Prozess der Wahrscheinlichkeitsermittlung für Sturzprozesse (Gefährdungsbilder A und C).

Im Fall potentieller großer Felsstürze mit Hanganbrüchen bis zur Hangkante (analog Ereignis von 1962) (Gefährdungsbild C) wird ein digitales Modell gewählt. Die potentiell betroffenen Hangbereiche (mit entsprechenden geometrischen und geologischen Voraussetzungen) werden in Flächen ohne erkennbare Indikatoren eines potentiellen Versagens (unwahrscheinlich, Restrisiko) sowie Flächen mit „Verdachtsmomenten“, in denen eine Gefährdung als möglich erachtet werden muss, unterteilt.

Probabilistik von Rutschprozessen (B)

Rutschprozesse wie Hanganbrüche (Gefährdungsbilder B) werden einer einfachen digitalen Wertung unterzogen. Sind ein oder mehrere Indikatoren dieses Prozesses in einem bestimmten Gebiet vorhanden, so wird es als wahrscheinlich betrachtet, dass zukünftige Erosionsprozesse der Lockergesteinsschicht auftreten (Verdachtsfläche):

> alte / aktive Rutschungen

> Erosionsspuren

> betrunkener Wald

> Kriechindikatoren

Kommentar: Große Rotations-Translationsrutschungen (Gefährdungsbild D) werden in diesem Bericht nicht probabilistisch gewertet. Geotechnische Messungen zeigen keine kritischen Deformationen. Weitere Untersuchungen (Geophysik) und neue Messrunden werden benötigt und sind in Planung.

Gefährdungsmatrix

Die für den Gefahren-Atlas Hangbewegung erarbeitete Gefährdungsmatrix ist in Kap. 6.6.4 dargestellt. Diese dient sozusagen als Schablone für die Zuweisung von Gefährdungsgraden.

Gefahrenkarten

Der Gefahren-Atlas Hangbewegungen umfasst als Zwischenergebnis drei Gefahrenkarten. Diese behandeln die Gefährdungsbilder A, B und C. Das Gefährdungsbild D (Rotations-Translationsrutschungen) dagegen ist regional nicht sinnvoll differenzierbar. Hier werden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, die schließlich zu aktualisierten Gefährdungs-/Risikoeinschätzungen für den gesamten Isarhang führen sollen.

In den Gefahrenkarten werden ***Verdachtsflächen*** von ***Restrisikoflächen*** unterschieden. In den Verdachtsflächen können für das Gefährdungsbild A (Stürze) weitere Differenzierungen getroffen werden (wenig wahrscheinlich / wahrscheinlich). In allen anderen Fällen sind weitere Spezialuntersuchungen erforderlich, um eine Verdachtsfläche näher zu präzisieren (z.B. spezielle Vermessung, Gefügeaufnahme, Sondierung, Geophysik).

6.6.3 Gefährdungsgrade – Zwischenergebnisse und Ausblick

Hinsichtlich des geologischen Aufbaus, steiler Hangmorphologie und der generellen grenzstabilen Situation gibt es über längere Sicht im Untersuchungsgebiet keine Bereiche frei von einer – wie auch immer gearteten - Gefährdung durch aktive oder zukünftige Massenbewegungen.

Gefährdungsbild A

Steinschläge sind im Bereich des Unterhanges über fast die gesamte Isarhanglänge zu erwarten, sofern Konglomeratwände erschlossen sind. Auch aus Hangschutt können sich zusätzlich Blöcke und Steine lösen. Da fast im gesamten Projektgebiet Konglomerat ansteht, ist bis auf die Bereiche unterhalb des Rabenwirtes, der Habenschadenstraße 33 und der Dr. Carl von Linde Straße eine Gefährdung durch Steinschlag i.Pr. gegeben.

Für den Abbruch von Konglomerat in **Blocksturz- bis Felssturz-Intensität** ist eine größere Mächtigkeit und tiefergreifende Entfestigung erforderlich. Unterstützt wird dies bei Vorliegen überhängender Felsbereiche oder durch auffallend große Trennflächen (große Erstreckung und/oder große Öffnungsweite), die in der geologischen Karte (Anlage 1.1 und Anlage 1.2) besonders hervorgehoben sind. Die in der Gefahrenkarten A ausgewiesenen Flächen mit einer Blocksturzgefährdung sind zuallererst von in der geologischen Karte verzeichneten älteren und rezenten Sturzbereichen abgeleitet. Zudem wird die lokale Gefährdung auf Bereiche mit offensichtlichen Entfestigung (Klüfte, Überhang) erweitert. Ältere Blocksturzbereiche mit nur wenigen stummen Zeugen am Hangfuß jedoch werden nur dann als Flächen mit erhöhter Sturzgefährdung belegt, wenn weitere Indizien vorliegen (siehe Kap. 6.6.2). Alte Felsstürze und potentiell durch Felsstürze gefährdete Bereiche wurden durch die detaillierte Kartierung lokalisiert. Anhaltspunkte zur Identifikation gefährdeter Bereiche sind (exponierte) Konglomeratwände mit einer Mächtigkeit > 2 m und mechanisch wirksame Durchtrennung. Die Bereiche alter Felsstürze haben die entsprechenden Kriterien (Wandhöhe, Entfestigung) erwiesenermaßen gehabt oder besitzen sie immer noch. Folgende Bereich wurden identifiziert und als Verdachtsflächen mit möglicher erhöhter Gefährdung ausgewiesen (siehe auch Gefahrenkarte A in Anlage 1.4):

Tab. 30: Verdachtsflächen für Anbrüche größerer Stürze (Blockschlag bis Felssturz).

Lokalität	Beschreibung
Hang östlich Burg Schwaneck	**Gefährdung A: Blocksturz bis Felssturz** Konglomeratnase, der Fuß ist bereits teilw. erodiert, hangseitig ist die Felsnase bereits großflächig von der Konglomeratwand getrennt.
Hangseitig Burgweg 2	**Gefährdung A bis C: Felssturz** Großflächiger, mit erodierten Rollkieslagen überzogener Konglomeratbereich. Die Trennflächen verlaufen annähernd parallel zur Felswand. **Massive Sicherung mit Spritzbeton und Ankern, beidseitig Kluftspione installiert.**
NE‘ Bürgerhaus #1 (ca. Burgweg 6)	**Gefährdung A: Blocksturz bis Felssturz** Vorspringende Konglomeratwand mit einer hangwärts einfallenden, im cm Bereich geöffneten Kluft, die in weiten Bereichen der Konglomeratwand nachzuverfolgen ist, der Fuß ist bereits erodiert.
NE‘ Bürgerhaus #2 (ca. Heilmannstraße 5)	**Gefährdung A: Blocksturz bis Felssturz** Sehr weit überhängende, stark zementierte Konglomerat-wand mit hangparallelen Klüften, unterlagernde Schotter bereits erodiert bzw. abgerutscht.
Hangseitig Villa Antika	**Gefährdung A: Blocksturz bis Felssturz** Überhängender Konglomeratbereich mit Klüften, teilweise mit Ziegelmauer verbaut, S‘ älterer Konglomeratabbruch
Hangseitig Habenschadenstraße 7	**Gefährdung A: Blocksturz bis Felssturz** Vorstehender Konglomeratbereich der an N‘ Seite eine deutliche, im cm-Bereich geöffnete, vertikale Kluft zeigt. Mittig ist etwas Konglomerat abgebrochen, das den Blick auf eine ca. 1 m hinter der Felskante verlaufende, vertikale Kluft freigibt.
Treppenweg Habenschadenstraße 21	**Gefährdung A: Blocksturz bis Felssturz** Konglomeratbereich mit rezenten Ausbrüchen, aktive und alte Sturzblöcke im Unterhang.

Gefährdungsbild B

Alte und rezente **Hanganbrüche** finden sich im Ober- wie auch Unterhang des Isarhochufers, speziell allerdings wie die detaillierte Kartierung (Anlage 1.1 und Anlage 1.2) zeigt, in Abschnitten entlang der Habenschadenstraße und Kirchplatz. In der Gefahrenkarte werden diese Abschnitte als Gefährdungsverdachtsflächen dargestellt.

Gefährdungsbild C

Die unter Gefährdungsbild A angeführten Sturzbereiche (Tab. 30) fallen auch in die Zonen, die als Verdachtsflächen für **große Felsstürze mit Hanganbrüchen** in Anlage 1.6 ausgewiesen wurden.

Bei diesem Mechanismus wird die „stützende Nagelfluhplatte“ soweit in Mitleidenschaft gezogen, dass ein Abbruch auch die darüberliegende Schottererrasse abrutschen/-stürzen lässt und der Abbruch bis über die Hangkante hinauswächst. In der Gefahrenkarte C ist der Gesamtbereich, in dem dieser Mechanismus geotechnisch und morphologisch möglich ist, dargestellt. Wie bereits seit 1962 bekannt, ist der hiervon i.W. gefährdete Bereich der Abschnitt Heilmannstraße-Burgweg. Trotz der lokal angebrachten Ankersicherungen bei Burgweg 2 und der

messtechnischen Überwachung mit Kluftspionen wird der Gesamtbereich als Verdachtsfläche eingestuft.

Hier muss angemerkt werden, dass eine fundierte Aussage zur Wahrscheinlichkeit bzw. dem Gefährdungsgrad erst mit weiteren Spezialuntersuchungen ermöglicht wird. Dazu gehören z.B. Gefügeaufnahmen, Monitoring und geophysikalische Untersuchungen.

Gefährdungsbild D

Rotations- und Translationsrutschungen sind im gesamten Projektgebiet ein über Jahrhunderte und Jahrtausende ablaufender und das Isartal prägender Prozesse. Statische Untersuchungen wie von Baumann 1988 [U 20] zeigen, dass sich fast die gesamten Hänge im Grenzzustand bezüglich des 40 m-Kriteriums befinden. Auch anhaltende Bewegungen im Bereich der Isarbrücke im Süden des Untersuchungsgebiets belegen dies. Gegensätzlich zeigen sich allerdings die geotechnischen Bohrlochmessungen (z.B. Inklinometer, Extensometer), die keine Aktivität im Bereich Habenschadenstraße bis Burg Schwaneck erkennen lassen.

In Bereichen von langjährigem Bohrlochmonitoring ohne nennenswerte Bewegungsraten oder sonstigen Indikatoren kann die Gefährdung zwar als gering eingestuft werden. Dies kann auch auf die Bereich dazwischen, die in identischer geologischer Ausprägung vorliegen angenommen werden. Dennoch ergaben jüngere Erkenntnisse aus der Geophysik Hinweise zur möglichen Erkennung von Großinstabilitäten des Hochufers, die im weiteren Projektverlauf geprüft werden sollen.

Als Zwischenberichtsergebnis muss die bestehende Gefährdung als Restrisiko eingestuft werden.

6.6.4 Signaturen und Kartendarstellung

Für die Darstellung der Gefährdungsgrade bzw. Verdachtsflächen in den Gefahrenkarten werden folgende Signaturen gewählt.

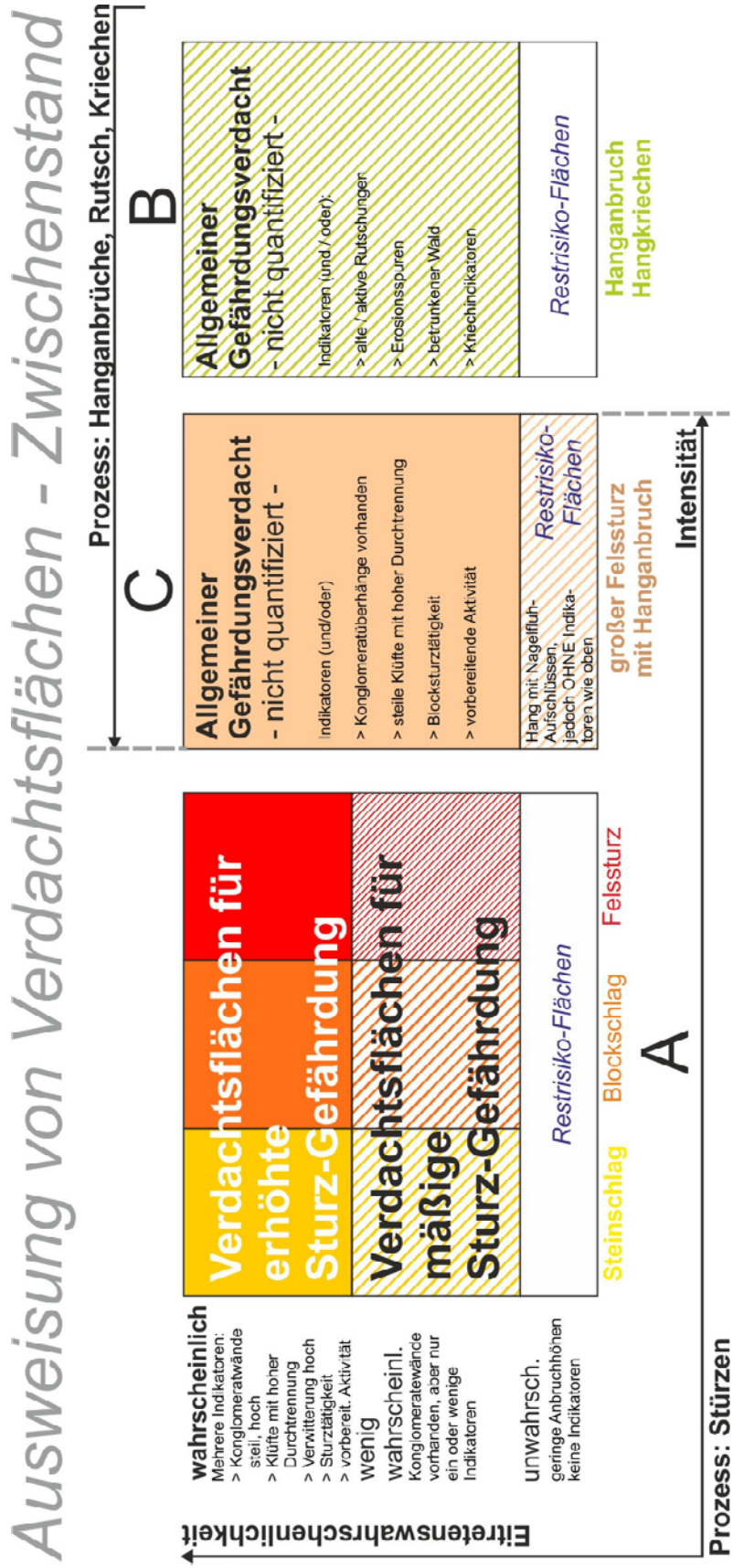


Abb. 48: Gefährdungsmatrix der Sturz- und Rutschprozesse gegliedert nach Gefährdungsbildern A, B und C.

7 Anwendung des Gefahren-Atlas Hangbewegungen

7.1 Kommentar zum Leistungsumfang

Der Gefahren-Atlas Hangbewegungen der Gemeinde Pullach basiert auf einer Detailkartierung und Bestandsaufnahme aller Daten und früheren Bearbeitungen und stellt somit ein umfassendes Archiv aller Massenbewegungsphänomene dar.

Die geologischen Karten mitsamt Erläuterungstext zeigen den Kenntnis- und Datenstand über das gesamte Pullacher Isarhochufers. So können beispielsweise Geologie (Verbreitung von Nagelfluh, Auftreten von Überhängen, Rutschungen…) genauso wie vorhandene technische Aufschlüsse (Baugrundbohrungen, Rammsondierungen, Messstellen) sofort bei Einsicht in die geologischen Kartenblätter recherchiert werden.

Darauf aufbauend wurden Gefährdungsarten differenziert und regional aufgeschlüsselt und in sogenannten Gefahrenkarten dargestellt. Diese Karten stellen die mit dem derzeitigen geowissenschaftlichen Kenntnisstand höchstauflösende Gefährdungseinschätzung dar.

Es sei hier allerdings nochmals vermerkt, dass der Gefahren-Atlas selbst noch keine Risikoanalyse beinhalten kann, sondern vielmehr die geowissenschaftliche Grundlage dafür darstellt.

7.2 Anwendungsmöglichkeiten

Der Gefahren-Atlas kann als Planungsgrundlage für die Gemeinde oder private Bauherren dienen, die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig.

- Gefahrenhinweise für behördliche Entscheidungsprozesse
- Grundlage für Planung optimierter geotechnischer Erkundungskonzepte
- Ermöglichung der Prävention und Sanierungsplanungen
- Grundlage für Planung von Überwachungskonzepten oder Alarmsystemen

8 Ausführungen zur GIS-Einbindung

Ein weiterer Aspekt des Gefahren-Atlas Hangbewegungen ist die geplante Einbindung der gesammelten Ergebnisse in das bestehende Geoinformationssystem der Gemeinde Pullach. Dazu zählen die Geologische Karte, alle im Gutachten erwähnten Bohr- und Sondierpunkte sowie die Bereiche bisheriger Sturz- und Rutschereignisse. In Kapitel 2.8 wurde bereits die Datenstruktur, welche die Grundordnung für die einzelnen Layer (z.B. Lithologie = alle Gesteinseinheiten in Form von Subtypes) ist, vorgestellt. Für die richtige Darstellung wird zudem noch eine style-Datei benötigt, welche die Informationen über die graphische Darstellung der einzelnen Subtypes

(innerhalb der Layer) enthält. Die style-Datei und die relevanten Daten für die Gemeinde werden im Zuge des Abschlussberichts samt Erläuterung übergeben.

9 Schlussbemerkung

Der vorliegende Bericht „Gefahren-Atlas Hangbewegungen“ stellt die geologisch-geotechnische Situation nach Abschluss der Master-Arbeit von Daniel Davies dar, in der auch Daten früherer Begutachtungen durch BBB oder anderer Bearbeiter eingearbeitet sind. Aufgrund jüngster Erkenntnisse ist gemäß unserem Angebot A15-083 eine weitere Bearbeitung vorgesehen. Diese Untersuchungen werden dann in den Abschlussbericht Ende des Jahres 2016 Eingang finden.

Für Rückfragen und/oder weitere Beratungen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Dr. Peter Neumann
(Dipl.-Geol. TUM)

Markus Bauer
(Dipl.-Geol. TUM)