



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: Dr. Peter Neumann
Markus Bauer
Daniel Davies

Telefon: +49-89-36040-467

Fax: +49-89-36040-100

e-mail: Peter.Neumann@baugeologie.de

Geo-Atlas Isarhochufer der Gemeinde Pullach im Isartal

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

Erläuterungsbericht

Abschlussbericht - März 2017

Projektnummer: 03793
Auftraggeber: Gemeinde Pullach im Isartal
Johann-Bader-Straße 21
82049 Pullach im Isartal
Datum: 15. März 2017

Vorbemerkung und Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht „Geo-Atlas Hangbewegungen“ der Gemeinde Pullach fasst ingenieurgeologische Bestandsaufnahme und Untersuchungen am Isarhang im Zeitraum Herbst 2013 bis Winter 2016/2017 zusammen. Die Arbeiten gemäß den Angeboten vom 30.7.2013 und 2.2.2016 sind abgeschlossen und Gefährdungsanalysen für die potentiellen Versagensprozesse Steinschlag bis Felssturz und Rutschprozesse / Hanganbrüche wurden erstellt. Die Arbeiten wurden in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU München ausgeführt.

Das Ergebnis ist eine umfangreiche Geo-Datenbank mit präzisen Karten der Hangbewegungen am Pullacher Isarhochufer.

Der Aufbau des Geo-Atlas Erläuterungsberichts ist wie folgt: In **Kapitel 1** und **Kapitel 2** werden zunächst Zielsetzung und wissenschaftliche Verfahrensweise sowie sämtliche Erhebungen und Untersuchungen detailliert dargestellt. Anschließend wird in **Kapitel 3** die aktuelle Kenntnis der historischen Geologie des Isarhochufers erläutert, woran sich eine ausführliche Darstellung der ingenieurgeologischen und wissenschaftlichen Bearbeitungen anschließt. In diesem Abriss der Bearbeitungsgeschichte in **Kapitel 4** sind Baugrunduntersuchungen und auch Schadensfälle und ihre geotechnische Aufarbeitung (Gutachten, Sanierungen, Bohrungen) seit den frühen 1960er Jahren nachlesbar. Hier können alle essentiellen historischen Informationen mit Quellennachweisen recherchiert werden.

Kapitel 5 schließlich ist die aktuelle ingenieurgeologische Bestandserfassung des Pullacher Isarhangs mit zahlreichen Unterkapiteln, z.B. zum geologischen Schichtenbau, zur Verfestigung und Diagenese, zur Hydrogeologie (Quellen, Brunnen...), sowie mit einem weit zurückreichenden historischen Abriss von Hangbewegungen, deren Auswirkungen noch heute erkennbar sind, und der anthropogenen Prägung des Isarhangs. In diesem Kapitel wird ebenfalls das bestehende messtechnische Inventar von der Burg Schwaneck bis nördlich der Grünwalder Brücke zum ersten Mal in seiner Gänze erfasst und bewertet.

Kapitel 6 beinhaltet die ausführliche und aktuelle Gefährdungsanalyse mit Klassifikation von Hangbewegungsprozessen, deren probabilistischer und regionaler Auswertung sowie den erhobenen Monitoringergebnissen u.a.. Des Weiteren werden Ergebnisse der geoelektrischen Transekte präsentiert und in hochauflösende ingenieurgeologische Querprofile übersetzt. Schließlich werden Funktionsweise und Kartendarstellungen erläutert und als Ergebnis in **Kapitel 6.7** die aktuelle Gefährdungsbewertung wiedergegeben.

In **Kapitel 7** werden Anwendungsmöglichkeiten des Geo-Atlas für die Gemeinde aufgezeigt.

Kapitel 8 zeigt schließlich die Konsequenzen aus ingenieurgeologischer Sicht auf, wie z.B. den Bedarf eines hochwertigen Monitoringprogramms sowie weiterführender Untersuchungen in drei Schwerpunktgebieten wie auch konkrete lokale Sanierungsmaßnahmen. Ebenso werden Wege aufgewiesen wie mit Gefährdungen im Rahmen eines Gemeinde-eigenen Risikomanagements in Zukunft umgegangen werden kann.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Ziele	11
1.1 Veranlassung.....	11
1.2 Konzept des Geo-Atlas Hangbewegungen.....	12
1.3 Kooperationspartner, Beteiligte und Ressourcen.....	14
1.4 Arbeitsgebiet.....	14
1.5 Aufgabenstellung, Ziele und Vorgehensweise	15
1.6 Verwendete Unterlagen	16
2 Methodik und Untersuchungen	21
2.1 Geologische Kartierung.....	21
2.2 Historische Recherche	22
2.3 Erhebung von Aufschlüssen und Labordaten	22
2.4 Installation von Deformationsmessungen.....	22
2.5 Recherche zu Sparten und Infrastruktur.....	24
2.6 Elektrische Resistivitätstomographie (ERT) des Isarhangs	24
2.7 Bodenkennwerte – Literaturstudie und ergänzende Analytik.....	26
2.8 Studie zu erdstatischen Berechnungen	27
2.9 GIS-Einbindung.....	28
3 Geologischer Rahmen	29
3.1 Historische Geologie im Süden Münchens	29
3.2 Neogener Flinz	32
3.3 Pleistozäne Schotterterrassen	32
3.4 Holozäne Entwicklung des Pullacher Isartales.....	33
4 Abriss der Bearbeitungsgeschichte	35
4.1 Burg Schwaneck - Burgweg - Heilmannstraße	35
4.2 Bürgerhaus Pullach	39
4.3 Kirchplatz	41
4.4 Habenschadenstraße - Treppenweg - Kalkofenweg.....	41
4.5 Brückenweg	44
4.6 Grünwalder Brücke	44
4.7 Geowissenschaftliche Bearbeitungen.....	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	51
5.2.3	Holozäne Bildungen	52
5.2.4	Geologische Einheiten der Kartenblätter 1:1000	53
5.3	Zementation und Verwitterung	53
5.4	Hydrogeologie	56
5.4.1	Grundwassersituation	56
5.4.2	Brunnen, Pegel, Quellen	57
5.5	Historischer Abriss dokumentierter Hangbewegungen.....	58
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	67
5.9	Hangbewegungsmonitoring.....	69
6	Ingenieurgeologische Gefährdungsanalyse	73
6.1	Klassifizierung der Hangbewegungen am Pullacher Isarhang	73
6.1.1	Lockergesteinsrutschung / Hanganbruch	75
6.1.2	Großrutschungen	76
6.1.3	Steinschlag	80
6.1.4	Blockstürze	80
6.1.5	Felssturz	82
6.2	Analyse der Aktivität der Hangbewegungen	84
6.2.1	Frequentistische Analyse	84
6.2.2	Regionale Differenzierung der Wirkungsräume und Aktivität.....	88
6.3	Deformationsmessungen.....	89
6.3.1	Ergebnisse des Monitoring in Borlochmessstellen	89
6.3.2	Ergebnisse der Konvergenzmessungen	91
6.3.3	Ergebnisse der Kluft- und Mauerspione	97
6.4	Aktualisierung der geologischen Modelle des Isarhangs.....	98
6.4.1	Ergebnisse der Elektrischen Resistivitätstomographien.....	98
6.4.2	Repräsentative ingenieurgeologische Querprofile	101
6.5	Auswertung früherer geotechnischer Berechnungen	101
6.6	Erstellung des Geo-Atlas Hangbewegung.....	104
6.6.1	Funktionsweise	104
6.6.2	Spezifikationen und Begriffe	106
6.6.3	Gefährdungsgrade – regionale Auswertung.....	111
6.6.4	Signaturen und Kartendarstellung.....	114

6.7	Ergebnisse der Gefährdungsanalyse mit Stand vom 15.3.2017	116
7	Anwendung des Geo-Atlas Hangbewegungen	119
7.1	Leistungsumfang	119
7.2	Anwendungsmöglichkeiten	119
7.3	Ausführungen zur GIS-Einbindung	120
8	Folgerungen / Ausblick	121
8.1	Geotechnisches Monitoring und Ausbau Messstellennetz	121
8.2	Aktualisierungen des Geo-Atlas	122
8.3	Weiterführende ingenieurgeologische Detailuntersuchungen	123
8.4	Kommentar zu Risikoanalyse und Risikomanagement	124
8.5	Empfehlung eines Katalogs an Sanierungskonzepten	125
8.6	Empfehlung Handlungsanweisungen	125
9	Schlussbemerkung	126

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	Prozesskarte Gefährdungsbild A – Sturzprozesse
Anlage 1.5	Prozesskarte Gefährdungsbild B – Erosion von Lockermaterial / Hanganbrüche
Anlage 1.6	Prozesskarte Gefährdungsbild C – Großer Felssturz
Anlage 1.7	Ingenieurgeologische Querprofile des Isarhangs
Anlage 2	Konvergenzmessungen – Auswertung
Anlage 3	Auflistung von Aufschlüssen der Neogen-Oberfläche
Anlage 4	Bodenuntersuchungen
Anlage 5	Fotodokumentation potentieller Felssturzbereiche
Anlage 6	Elektrische Resistivitätstomographien

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Veranschaulichung der Grundidee des Geo-Atlas Hangbewegungen Pullach im Vergleich mit regionalen behördlichen Gefährdungsanalysen und geotechnischen Untersuchungen nach DIN 4020.	13
Abb. 2: 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.	15
Abb. 3: Links: Gespanntes Extensometer an der KVM 1/8 mit Blickrichtung Werkkanal; Beispiele von Mauer- und Kluftspionen, Mitte: P3 Habenschadenstraße 17 (seit 2013), rechts: M1, Konglomeratüberhang am Treppenweg (seit 2005).....	23
Abb. 4: Links: Steuereinheit der Multielektrodenanlage. Rechts: Kabelauslage auf der Hangschulter (Transekt 1 – Burgweg).....	25
Abb. 5: Vereinfachter geologischer Überblick der Münchener Schotterebene zwischen der südlichen Moränenlandschaft und dem tertiären Hügelland [U 28]. Der dunkelblaue Pfeil zeigt auf das Ortszentrum Pullachs.....	29
Abb. 6: Erdgeschichtliche Tabelle für München und Pullach (nach [U 28]). Die Abkürzungen bezeichnen die Formationen gemäß amtlichem Kartenblatt von München 1:50.000 [U 20]. Das Isarhochufer in Pullach wird i.W. von dem Flinz (mio) aufliegenden jüngeren Deckenschottern (M, G) und rißzeitlicher Hochterrasse (R, G) aufgebaut.....	31
Abb. 7: Paläogeographie Münchens und Pullachs in zwei erdgeschichtlichen Phasen [U 22] [U 28].	31
Abb. 8: Stratigraphie des Pullacher Untergrundes mit dem tief eingeschnittenen Isartal und der Verflachung im Stadtgebiet von München (aus [U 22]).	33
Abb. 9: Profilschnitt durch den Isartal-Canyon südlich von Grünwald / Pullach (Ausschnitt aus der amtlichen geologischen Karte 1:50.000 [U 20]), 5-fach überhöht.	33
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 Nordosten (entnommen aus: Baumann 2014 [U 24]).	36
Abb. 11: Gründungsarbeiten für das 1996 fertiggestellte Bürgerhaus. Rechts sind Werkkanal und Isar zu erkennen. Blickrichtung Norden (entnommen aus: Baumann 2014 [U 24]).	39
Abb. 12: Rutschung am Kirchplatz 1 von 2013 [U 12]. Die grünen Punkte in der Geologischen Karte (links) stellen die Messfixpunkte der Konvergenzmessstrecken KVM-2 und -3 dar. Das Foto zeigt die Rutsch- bzw. Transportfläche, die Abrisskante ist durch die Vegetation am Gelände verdeckt. Blickrichtung Nord.....	41
Abb. 13: Überblick über die Erkundung im Widerlagerbereich der Grünwalder Brücke (entnommen aus: Baumann 2014 [U 24]).	45
Abb. 14: Geologisch-geotechnische Profile mit Darstellung der alten Grünwalder Brücke (entnommen aus: Baumann 2014 [U 24]).	45
Abb. 15: Überblick der wissenschaftlichen Bearbeitung durch Studienabschlussarbeiten am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU München.	46
Abb. 16: Vereinfachte geologisch-morphologische Übersicht des Isarhochufers im Gemeindebereich Pullach. Die Transekte 1 bis 5 zeigen die Lage der geoelektrisch gescannten Hangprofile (ERT), die auch gleichzeitig den ingenieurgeologischen Querprofilen dieser Arbeit (siehe Anlage 1.7) entsprechen (unmaßstäblich).....	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	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. 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].....	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 22]). Die riesigen Nagelfluhblöcke sind bereits entfernt worden. Das Gemälde dokumentiert also ein früheres Großereignis.....	58
Abb. 25:	Übersichtskarte dokumentierter Massenbewegungen im Projektgebiet seit 1940, die zeitlich und räumlich zugeordnet werden konnten.....	60
Abb. 26:	Rutschung/Sturz (Hanganbruch) von aufgewittertem Konglomerat und Lockermaterial unterhalb der Habenschadenstraße 17 im Jahr 1995 (Foto zur Verfügung gestellt von Familie Schütze).	61
Abb. 27:	Vereinfachte Charakterisierung der Bebauungs- und Nutzungssituation im Bereich des Pullacher Isarhochufers.	62
Abb. 28:	Darstellung der kritischen Hanghöhe im Projektgebiet (nach Baumann, 1988 [U 23]). Die roten Zonen im nördlichen Blattbereich sind jedoch spekulativ, da mögliche alte Nackentälchen und Rutschkörper hier durch Erdbewegungen des frühen 20. Jahrhunderts nicht mehr definierbar sind. (unmaßstäblich)	68
Abb. 29:	Zusammenfassung der Monitoring-Einrichtungen am Pullacher Isarhochufer. Weitere geodätische Vermessungsnetze können vorhanden sein, werden aber nicht gemessen bzw. sind eventuell auch nicht mehr zugänglich.....	71
Abb. 30:	Schema zur Mechanik und Dimension der prinzipiellen Gefährdungsbilder A bis D am Pullacher Isarhang.....	74
Abb. 31:	Schematisches Profil einer Lockergesteinsrutschung mit Rutschungskrone, Abbruchkante und Gleitfläche.....	75
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.	76
Abb. 33:	Entwicklungsschema einer kombinierten Rotations-Translationsrutschung mit den Phasen (von links oben nach rechts unten): Grenzgleichgewicht (1), Ausbildung von Zerrspalten im Konglomerat (2), vertikale Setzungen und Verdrängen der unterlagernden Schichten (3), Übergang in ein planares Gleiten (4), relictische Rutschscholle mit erodierter talseitiger Melange (5). Rechts unten: Blick in das Nackentälchen am „Brückenweg“ mit deutlich erkennbaren verkippten Rutschschollen im Jahr 2017.	77
Abb. 34:	Abrisskante in Terrassenschottern und Rutschungskopf mit betrunkenem Wald bei Grünwald. Das Bild zeigt die in obiger Abbildung (Bild 3) skizzierte Phase. – Foto: H.J. Baumann [U 30].	78

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.	81
Abb. 36:	Potentieller Felssturzblock ca. 80 m südöstlich der Burg Schwaneck (Gefährdungsbild A). 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).	83
Abb. 37:	Großer Felssturz von 1962 unterhalb der Burg Schwaneck (Gefährdungsbild D). Links: Östliche Abbruchkante der Nagelfluh, Sicherung mit Ankern und Spritzbeton (rechter Bildrand). Im darüber liegenden bewaldeten Hang kam es zu einem Hanganbruch bis zur oberen Kante, der in Abb. 10 sichtbar ist. Rechts: Grobe Felssturzschollen am Hangfuß. ...	83
Abb. 38:	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.	84
Abb. 39:	Vergleich der Hangkante heute – 1841 (Quelle: heute (dgm2 des Landesamtes für Vermessung), 1841 (Bayernatlas, historische Karte 1817-1841).....	86
Abb. 40:	Die Konvergenzmessstrecken Burgweg (KVM 4), vergrößert aus der Geologischen Karte mit absoluten Abstandsmessungen. Rot = Verkürzung, blau = Verlängerung der Messstrecke. (Stand: 08/2016)	92
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. (Stand: 08/2016).....	94
Abb. 42:	Die Konvergenzmessstrecken Habenschadenstraße 15, vergrößert aus der Geologischen Karte mit absoluten Abstandsmessungen. Rot = Verkürzung, blau = Verlängerung der Messstrecke. (Stand: 08/2016)	96
Abb. 43:	Ausschnitt der Legende zu den ingenieurgeologischen Querprofilen der Anlage 1.7 (geotechnische Homogenbereiche).....	101
Abb. 44:	Darstellung der Arbeitsschritte und des Leistungsumfangs des „Geo-Atlas Hangbewegungen“: Von der lokalen Erkennung von Naturgefahren, deren regionaler Erfassung bis hin zur „Gefahrenkarte“. Diese wird dann in weiteren Schritten Grundlage der Risikoanalyse und des Risikomanagements sein.	105
Abb. 45:	Verteilung der bewegten Kubaturen / Intensitäten der verschiedenen Gefährdungsprozesse. Derr Übergang von großen Felsstürzen mit Hanganbrüchen zu Rutschungen großer Hangbereiche ist fließend.	106
Abb. 46:	Grafik zur Veranschaulichung der für den Raum Pullach gültigen Pauschalwinkel am Beispiel aus Großhesselohe [U 17].....	107
Abb. 47:	Prozess der Wahrscheinlichkeitsermittlung für Sturzprozesse (Gefährdungsbilder A und C).	109
Abb. 48:	Gefährdungsmatrix der Sturz- und Rutschprozesse gegliedert nach Gefährdungsbildern A, B und C.	115
Abb. 49:	Ergebnis der Gefährdungsanalyse mit Ausweisung von Gefährdungsschwerpunkten mit Bedarf an Spezialerkundung/Untersuchung sowie Einzelobjekten mit umzusetzenden Sanierungs- / Stabilisierungsmaßnahmen, die z.T. schon initiiert sind.	118
Abb. 50:	Linearer Potentiometer-Rissmesser (Crackmeter). (aus: www.geokon.com).....	122

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Zusammenfassung der in der geologischen Karte verwendeten Abkürzungen für technische Einrichtungen.	22
Tab. 2: Geoelektrische ERT Profile am Pullcher Isarhang (2015 bis 2016).	24
Tab. 3: Spezifische Widerstände der Gesteine im Untergrund von Pullach [U 62], die als erster Interpretationsansatz dienen und später bei unserer Auswertung spezifiziert werden.	26
Tab. 4: Zusammenstellung durch BBB berechneter geotechnischer Querprofile.	27
Tab. 5: 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).	37
Tab. 6: 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. 7: Ergebnisse der Schweren Rammsondierung an der Hangkante (Heilmannstraße 8) aus dem Jahr 1996, durchgeführt vom Prüfamf für Grundbau, TU München (Quelle: Datenbestand des LfU).	38
Tab. 8: Ergebnisse der Schweren Rammsondierungen am Bürgerhaus im Hangbereich (DPH 1-7) und am Gebäude (DPH-8) (Quelle: Datenbestand des LfU).	39
Tab. 9: Ergebnisse der Kernbohrungen am Bürgerhaus im Bereich des Gebäudes (NMB 1) und im Hangbereich (GMB 2, TVB 3) (Quelle: Datenbestand des LfU).	40
Tab. 10: Ergebnisse der Kernbohrung BK-1 und der Schweren Rammsondierungen (DPH1-3) hangseitig des Anwesens Habenschadenstraße 13 [U 53].	42
Tab. 11: Ergebnisse der Handbohrungen im Oberhang und der KRB am Hangfuß bei Habenschadenstraße 23-27 [U 3].	43
Tab. 12: Ergebnisse der Rammkernbohrungen an der Habenschadenstraße 33 im Bereich der Hangkante und am Hangfuß (Quelle: Datenbestand des LfU).	44
Tab. 13: Ergebnisse der Handbohrungen im Oberhang am Brückenweg sowie der Schweren Rammsondierungen am Hangfuß [U 6].	44
Tab. 14: Zusammenfassung der Flinz-Aufschlüsse im Projektgebiet.	50
Tab. 15: Zusammenfassung zu den holozänen Böden und Fels.	52
Tab. 16: Ergebnisse Vorläufiger Katalog dokumentierter historischer Hangbewegungsereignisse seit dem 20. Jahrhundert).	59
Tab. 17: Zusammenstellung der in Gutachten verwendeten Kennwerte. Die unterschiedlichen Bezeichnungen der Schichten wurden hier soweit möglich vereinheitlicht (siehe [U 31])... ..	65
Tab. 18: Vergleich von Bodenkennwertsätzen verschiedener Bearbeitungen mit ungefähre Schichtkorrelation. Es werden jeweils Reibungswinkel ϕ' [°], Kohäsion c' [kN/m ²] und Wichte γ [kN/m ³] angegeben (aus [U 16]).	66
Tab. 19: Orientierende charakteristische Boden- und Felskennwertsätze des „Geo-Atlas Hangbewegungen“, differenziert in aktuelle (A) und sich potentiell ungünstig entwickelnder Kennwerte (B) (aus [U 16]).	66
Tab. 20: Geotechnisch instrumentierte Bohrungen am westlichen Isarufer zwischen Grünwalder Brücke und Burg Schwaneck.	69
Tab. 21: Bestehende geodätische Messprofile.	70
Tab. 22: Konvergenzmessstrecken, installiert durch BBB im Jahr 2014.	70
Tab. 23: Kluft- und Mauerspione, mit Ausnahme Burgweg 2 installiert durch BBB in den Jahren 2005 [U 9] und 2013 [U 11].	72
Tab. 24: Zusammenfassung der markanten Großrutschungskörper im Projektgebiet. Streichen und Fallen der rotierten Schichtstapel entweder gepeilt oder durch Direktmessungen am anstehendem Konglomerat (kursive Werte) bestimmt.	78
Tab. 25: 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.	87
Tab. 26:	Absolute Bewegungen der einzelnen Messstrecken der Konvergenzmessstrecke Burgweg (KVM 4) sowie deren ursprüngliche Länge. Negative Werte = Verkürzung, positive Werte = Verlängerung der Messstrecke.	92
Tab. 27:	Absolute Bewegungen der einzelnen Messstrecken der Konvergenzmessstrecken am Rabenwirt (KVM 2+3) sowie deren ursprüngliche Länge. Negative Werte = Verkürzung, positive Werte = Verlängerung der Messstrecke.	93
Tab. 28:	Absolute Bewegungen der einzelnen Messstrecken der Konvergenzmessstrecke Habenschadenstraße 15 (KVM 1) sowie deren ursprüngliche Länge. Negative Werte = Verkürzung, positive Werte = Verlängerung der Messstrecke.	95
Tab. 29:	Ergebnisse der Kluftspion-Messungen an den Terrassen der Habenschadenstraße 15 und 17.	97
Tab. 30:	Ergebnisse der Kluftspion-Messungen an den Nagelfluhwänden am Treppenweg (Angabe in cm).	97
Tab. 31:	Zusammenstellung durch BBB berechneter geotechnischer Querprofile. Anmerkungen: μ_{\max} bezeichnet den maximalen Auslastungsgrad nach Teilsicherheitskonzept (BLAU), η dagegen kennzeichnet globale Standsicherheiten. In Rot gehalten sind Ergebnisse, die Überlastung bzw. nicht ausreichendes Sicherheitsniveau nach Norm anzeigen	102
Tab. 32:	Begriffsdefinition und Volumenangaben zu Sturzmassen.	106
Tab. 33:	Empirisch ermittelte Aktivität und Jährlichkeit der definierten Gefährdungsbilder.	110
Tab. 34:	Ausgewiesene Beispiele anbruchgefährdeter Nagelfluhaufschlüsse ab mindestens 5m ³ (großer Blocksturz bis Felssturz) als Ergebnis der ingenieurgeologischen Kartierung 1:1.000 (siehe Anlage 5).....	112
Tab. 35:	Gegen Gesamtversagen gesicherter Nagelfluhabschnitt unterhalb Burgweg 2. Kleinere Sturzprozesse, die sich aus der Wand lösen sind jedoch nicht ausgeschlossen.....	113
Tab. 36:	Vorgeschlagenes Monitoringprogramm der Gemeinde Pullach (Start 2017).	121

1 Ziele

1.1 Veranlassung

Die Gemeinde Pullach erstreckt sich am westlichen Isarhochufer, das steil und zum Teil dicht bebaut ist. Entlang der Habenschadenstraße über den Kirchplatz und die Heilmannstraße bis hin zur Karl-Schröder-Straße beispielweise reicht die Bebauung bis zur Hangkante und verschiedene Fuß- und Fahrwege 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. Auch aktuell besteht Bearbeitungsbedarf. So wurde beispielsweise in diesem Winter der Isarhang in der nördlich des gegenständlichen Bearbeitungsgebiet befindlichen Wenzsiedlung einer umfangreichen Untersuchung und Sanierungsplanung unterzogen [U 18]. Des Weiteren steht die zunehmende Schuttablagerung auf dem Kalkofenweg durch Erosion von Geröll des Hangs im Fokus der Ingenieurgeologie. Auch die Situation des Fußwegs vom Bürgerhaus zur Isar ist wegen des Rutsches unterhalb der Gaststätte Rabenwirt aus dem Jahr 2013 noch nicht geklärt [U 12]. Bereiche der Habenschadenstraße waren ebenfalls Gegenstand der Begutachtung durch verschiedene Bearbeiter, an einem Grundstück wurde 2016 eine Hangsicherung eingebracht. Dies sind einige aktuelle Beispiele.

Dies alles zeigt, dass sich Hangkanten wie das Isarhochufer natürlicherweise lediglich in einem „metastabilen“ Zustand befinden und dazu neigen, sich durch erosive Prozesse landeinwärts rückzuverlegen. Diese Prozesse sind natürlich und laufen im Schnitt relativ langsam ab (Verwitterung) oder treten als episodische Ereignisse auf (Stürze und Rutsche).

Dem Einfluss des Menschen muss bei solchen metastabilen Verhältnissen besondere Beachtung geschenkt werden. Belastungen der Hangkante durch Bauwerke oder Verkehr können sich genauso negativ auf die Standsicherheit der Hänge auswirken wie Entlastungen am Hangfuß (durch Abgrabungen oder die natürliche Isareintiefung). Eine ganz entscheidende Rolle für die Hangstabilität spielen zudem die 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 Baugeologische Büro Bauer GmbH ist bereits seit dem Jahr 2003 mit ingenieur- und hydrogeologischen Untersuchungen und Sanierungsplanungen im Bereich der Gemeinde Pullach betraut. Darunter fallen auch verschiedene Schadensfälle durch Hangbewegungen am Isarhochufer.

Am 6. August 2013 wurde die Baugeologische Büro Bauer GmbH schließlich beauftragt, eine geologisch-geotechnische Gesamterfassung und Gefährdungsanalyse des Isarhangs im Bereich

der Gemeinde Pullach zu erstellen (Angebot A13-039). Dieses Gesamtoperat wird als „Geo-Atlas Hangbewegungen“ bezeichnet und soll der Gemeinde als Werkzeug zur Gefahrenerkennung und Risikominimierung dienen und in Bauleitplanung und behördliche Entscheidungsprozesse einfließen. Die vorläufigen Ergebnisse wurden in einer Entwurfsversion in unserem Zwischenbericht vom 15.2.2016 zum ersten Mal niedergelegt. Weitere Untersuchungen und Ausarbeitungen folgten im Jahr 2016 (Angebot A15-083). Die Bearbeitung wurde in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der Technischen Universität München durchgeführt und Teile davon sind in eine Masterarbeit (M.Sc. Daniel Davies) gemündet. Der Lehrstuhl für Ingenieurgeologie hat in der Vergangenheit bereits mehrere Kartierungen und Abschlussarbeiten im Isartal (z.B. in Grünwald etc.) durchgeführt.

Der vorliegende Bericht stellt die überarbeitete und vollständig ausgewertete Fassung des „Geo-Atlas Hangbewegungen“ der Gemeinde Pullach dar.

1.2 Konzept des Geo-Atlas Hangbewegungen

Die komplexe Erhebung und Analyse der natürlichen Gefahren durch Hangbewegungen in einem doch relativ großen Gebiet erfordert die Entwicklung eines Arbeitsprozesses, der eine konsequente Aufarbeitung unter objektiven Maßstäben ermöglicht.

Anmerkung: Der Begriff „Gefahr“ wird in diesem Bericht im geologisch-fachtechnischen Sinne verwendet und bezeichnet den Prozess einer Hangbewegung oder Massenumlagerung.

Es handelt sich beim Geo-Atlas Hangbewegungen nicht um eine lokal beschränkte ingenieurgeologische Maßnahme, wie einem Bauprojekt mit spezifischer Untersuchung (z.B. Gründung des Brückenwegs oder Sanierungsplanung Wenzsiedlung). Stattdessen muss der Isarhang im beinahe gesamten Gemeindebereich Pullachs gefahrentechnisch in voller Fläche bewertet werden. Dazu orientiert sich diese Studie an wissenschaftlich entwickelten und von öffentlichen Stellen angewendeten Konzepten regionaler Gefährdungsanalysen. So haben beispielsweise das Landesamt für Umwelt (LfU) in Bayern oder auch das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) in der Schweiz Gefahrenhinweiskarten erstellt und entsprechende Empfehlungen herausgegeben. Diese sind überregionaler Natur (z.B. Landkreis-Ebene) und somit kleineren Maßstabs, dennoch vom Prinzip her anwendbar. Eine Einordnung des „Geo-Atlas“ im Kontext der regionalen und lokalen Gefahrenbewältigung zeigt Abb. 1.

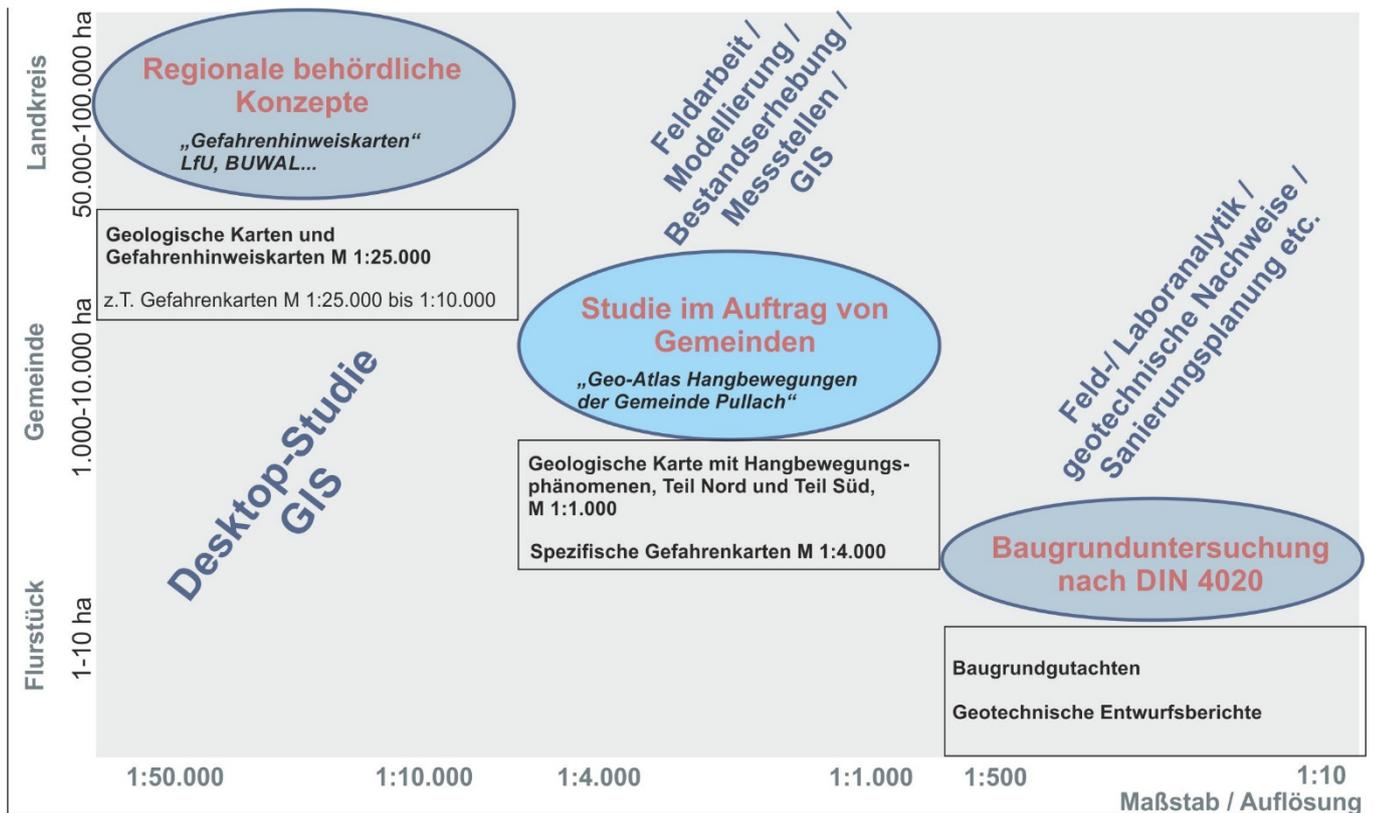


Abb. 1: Veranschaulichung der Grundidee des Geo-Atlas Hangbewegungen Pullach im Vergleich mit regionalen behördlichen Gefährdungsanalysen und geotechnischen Untersuchungen nach DIN 4020.

Im Wesentlichen werden bei den großräumlichen Analysen (Desktopstudien) **Gefahrenhinweiskarten** in GIS modelliert. Diese weisen anhand geometrischer Modelle gefährdete Flächen aus, jedoch ohne genauere Bewertung. Sie dienen der Erkennung der potentiellen Gefahren. Bei Erstellung der **Gefahrenkarten** erfolgt dann eine Gefahrenbeurteilung mit Wirkungsräumen, Wahrscheinlichkeiten und Intensitäten der Naturprozesse wie z.B. Felsstürze oder Lawinen. Dabei werden allerdings bereits erhebliche Geländedaten benötigt, weshalb hauptsächlich Gefahrenhinweiskarten verbreitet sind. Eingang finden die Erkenntnisse in Bauleitplanung oder Flächennutzungsplanung und Risikoanalysen, sie sind also Werkzeug für öffentliche Stellen oder auch private Nutzer.

Dieses Schema wird auch hier angewendet, allerdings fußend auf deutlich höherer Datendichte und durch die detaillierte geologische Kartierung. **Die Karten des Geo-Atlas Hangbewegungen Pullach können schließlich zur Grundlage der Risikoermittlung und -bewertung (z.B. Gefahrenzonenpläne) werden, sie sind Planungshilfe für Überwachungsprogramme oder zum Entwurf von spezifischen Baugrunduntersuchungen oder Sanierungskonzepten. Auch zeigen sie Handlungsbedarf auf, z.B. für weitere Untersuchungen. Sie können jedoch nicht grundstücksscharfe Baugrunduntersuchungen im Rahmen von Bauvorhaben und Sanierungsarbeiten ersetzen.**

1.3 Kooperationspartner, Beteiligte und Ressourcen

Die Feldarbeiten sowie Auswertungen und Modellierungen wurden in einer Arbeitsgemeinschaft aus Baugeologisches Büro Bauer GmbH und Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der Technischen Universität München ausgeführt. Kooperationspartner sind namentlich Prof. Dr. Kurosch Thuro (Ordinarius, Ingenieurgeologie), Prof. Dr. Michael Krautblatter (Fachbereich Hangbewegungen) und M.Sc. Daniel Davies (Masterand). Der Lehrstuhl zeichnet unter anderem verantwortlich für geophysikalische Untersuchungen.

Das Landesamt für Umwelt (LfU), ehemals Bayerisches Geologisches Landesamt, ist wichtigste Quelle für Bestandsdaten und frühere wie auch aktuelle technische Messüberwachungen. Wertvolle Unterstützung liefern hierbei Herr Dipl.-Ing Thomas Gallemann sowie der frühere Mitarbeiter und ausgewiesene Spezialist für Pullach und Grünwald, Herr. Dr. Ing. Jürgen Baumann.

1.4 Arbeitsgebiet

Die Gemeinde Pullach im 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.

Im Herbst und Winter 2016/2017 wurde zudem ein 350 m langer Hangstreifen in der Wenzsiedlung an der nördlichen Gemeindegrenze Pullachs bearbeitet [U 17]. Ein Lückenschluss mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Arbeitsgebiet würde sich in Zukunft anbieten.

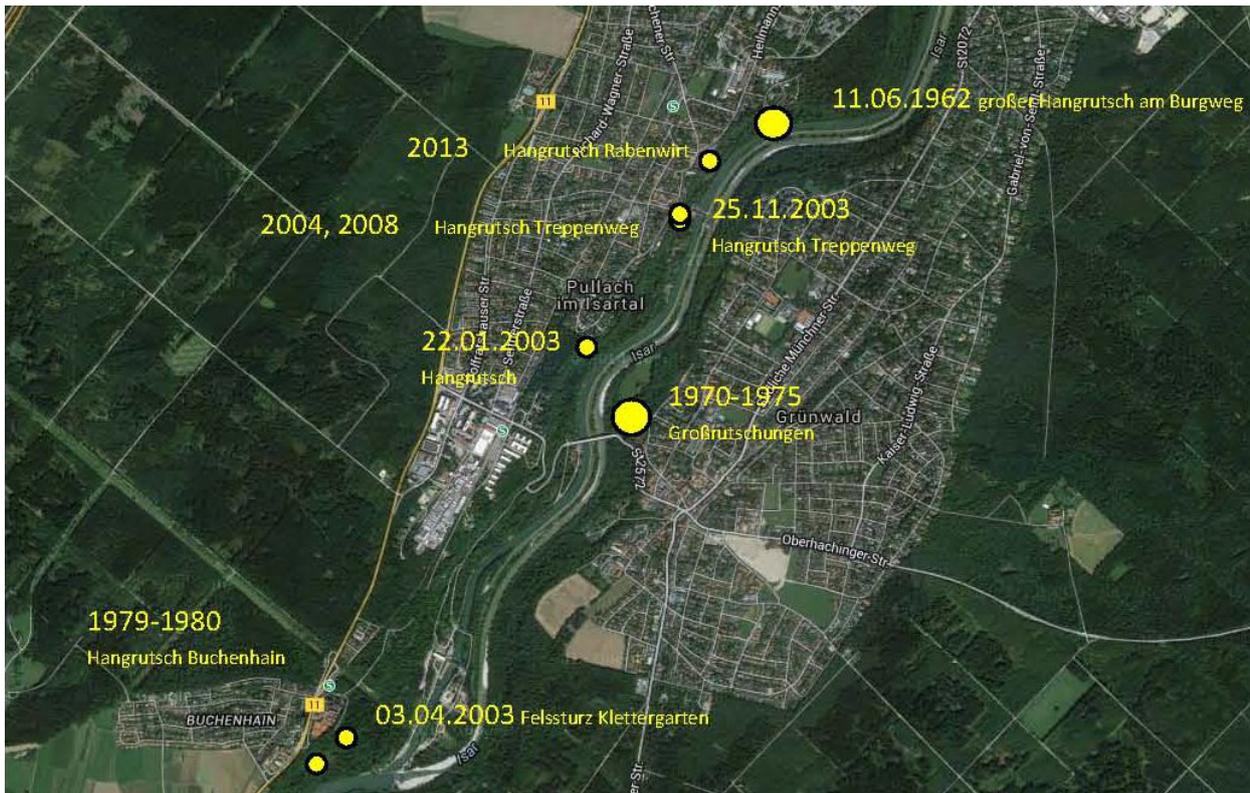


Abb. 2: Überblick des Arbeitsgebietes und seiner weiteren Umgebung mit Eintragung einiger historischer Rutsch- oder Sturzereignisse. Das Arbeitsgebiet befindet sich im oberen Abschnitt, nördlich der Grünwalder Brücke. Besonderes Ausmaß hatten die Großrutschungen im Bereich der Brücke in den siebziger Jahren sowie der große Abbruch am Burgweg 1962.

1.5 Aufgabenstellung, Ziele und Vorgehensweise

Um die geologische, geotechnische und hydrogeologische Situation entlang der Hangkante im Gemeindegebiet von Pullach beurteilen zu können, wurde eine Erhebung aller relevanten Parameter durchgeführt werden. Wesentliche Erhebungsmerkmale sind dabei: Verbreitung, Eigenschaften und Zustand der Fest- und Lockergesteine, Grund- und Schichtwasserverhältnisse, Hangbewegungsinventar, präzise Verformungsmessdaten, Kenntnis zu anthropogenen Eingriffen, Auswertung von Standsicherheitsbetrachtungen verschiedener Projekte und anderes mehr.

Mithilfe dieser Erhebung und Dokumentation werden thematische Kartensätze erstellt, beginnend mit hochauflösenden geologischen Karten (Maßstab 1:1.000) inklusive Erfassung fossiler und aktiver Hangbewegungen. Diese sind, wie schon ausgeführt, Basis für die prozessbezogenen Karten, 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 geologische Kartierung des Hanges durchgeführt, des Weiteren wurden Bodenproben untersucht und zahlreiche Sondierungen abgeteuft. Vermessungsdaten wurden zur Erstellung eines digitalen Geländemodell (DGM) zur Kartierung und als topographische Grundlage für die Bearbeitung in einem Geoinformationssystem verwendet. Weitere Beobachtungen (Bewegungsmessungen des LfU etc.) und vorhandene Gutachten und Stellungnahmen wurden recherchiert und ausgewertet.

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

1.6 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)
- [U 17] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2017): Ingenieurgeologische Bestandsaufnahme und Georisiko-Analyse am Isarufer in der Wenzsiedlung, Pullach im Isartal.- Geologisch-geotechnischer Bericht, Januar 2017. (BBB-Projekt-Nr. 04233)
- [U 18] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2017): Instandsetzung bestehender Fangzäune „An-der-Isar“, Wenzsiedlung, Pullach im Isartal.- Technischer Entwurf für Sicherungsmaßnahmen (Bericht), Februar 2017. (BBB-Projekt-Nr. 04233)
- [U 19] Baugeologisches Büro Bauer GmbH (2017): Erneuerung Brückenweg Pullach – Geotechnische Stellungnahme zur Planung von PBF.- Ergänzung zum Baugrundgutachten vom 6.5.2011, Januar 2017. (BBB-Projekt-Nr. 02163)

Grundlagenliteratur - Regionale Geologie:

- [U 20] BGLA (1995): Geologische Karte von München, L7934, 1 : 50 000.- München (BGLA).
- [U 21] BGLA (1953): Geologisch-hydrologische Karte von München, mit hydrologischem Deckblatt, 1 : 50 000.- München (BGLA).
- [U 22] 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 23] Baumann, H.J. (1988): Bruchvorgänge in Folge der Isareintiefung südlich Münchens und die kritischen Höhen der Talhänge.- Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität, Schriftenreihe, Heft 12.
- [U 24] Baumann, H.J. (2014): Ingenieurgeologische und geotechnische Exkursion im Isartal.- Exkursionsführer.
- [U 25] Baumann, H.J. & Galleman, Th. (1995): Einwirkung von Rutschmassen auf eine alte Stahlbetonbrücke über die Isar.- Vortrag, 10. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, Freiberg, Mai 1995.
- [U 26] Baumann, H.J. & Galleman, 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 27] Baumann, H.J., Kranzenberger, A. & Kröger, J. (1975): Beschreibung einer Rutschung südlich von München.- *Geologica Bavarica*, 74: 193-208.
- [U 28] 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 29] Lemcke, K. (1998): Geologie von Bayern I. Das bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit. 175 S., Schweizerbart, Stuttgart.
- [U 30] Galleman, Th. (2012) Geodätische und geotechnische Langzeitbeobachtungen an einer Rutschung im Isartal südlich von München. – *VDVmagazin*, 6/2012: 474-479.

Grundlagenliteratur – Bachelor-/Master-Arbeiten TU München:

- [U 31] Davies, D. (2015): Geo-Atlas Hangbewegungen der Gemeinde Pullach im Isartal – Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Gefährdung und Standsicherheit der Hänge am westlichen Isarufer zwischen Burg Schwaneck und Grünwalder Brücke.- Masterarbeit TU München, November 2015.
- [U 32] Biersack, F. (2008): Kartierung der Hangbewegungsphänomene am rechten Isarufer bei Grünwald.- Bachelorarbeit TU München, August 2008.
- [U 33] Scherzer, K. (2009): Kartierung der Hangbewegungsphänomene am Hochufer der Isar bei Grünwald.- Bachelorarbeit TU München, August 2009.
- [U 34] Starace, C. (2009): Kartierung der Hangbewegungsphänomene am linken Isarufer bei Pullach.- Bachelorarbeit TU München, August 2009.
- [U 35] Steinsdörfer, J. (2009): Kartierung der Hangbewegungsphänomene am Hochufer der Isar

bei Pullach.- Bachelorarbeit TU München, August 2009.

[U 36] Leinauer, J. (2014): Quartärgeologische Kartierung im Isartal westlich Kloster Schäftlarn.- Bachelorarbeit TU München, August 2014.

[U 37] Staudacher, M. (2014): Quartärgeologische Kartierung im Isartal westlich Schäftlarn.- Bachelorarbeit TU München, August 2014.

Grundlagenliteratur - Massenbewegungen, Gefährdungsanalyse, Gefahrenhinweiskarten,

Georisiken:

[U 38] 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 39] 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 40] 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 41] 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 42] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2012): Gefahrenhinweiskarte Bayerische Alpen - Schutz vor Georisiken: Erfahrungen und praktische Umsetzung.- Bericht zur Fachtagung am 27. März 2012.

[U 43] 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 44] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2004): Erneuerung einer DHH, Habenschadenstraße 13 in Pullach (Anwesen Poetis); Standsicherheit des Isarhangs. – Gutachten vom 15.11.2004.

[U 45] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2013): Abschließender Bericht zu den messtechnischen Beobachtungen im Isarhang zwischen Badstraße und Habenschadenstraße.- Stellungnahme vom 18.11.2013.

[U 46] 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 47] Schäfer, I. (1962): Geologisches Gutachten über die Hangrutschungen am Isar-Steilhang von Pullach.- Gutachten vom 21.08.1962.

[U 48] Jelinek, R. (1962): Sicherheitsmaßnahmen am Isarhang in Pullach, Gefährdung des

Wohngebäudes Pullach, Burgweg 2.- Gutachten vom 29.10.1962.

- [U 49] Bayerisches Landesamt für Umwelt (1963): Erkundungsbohrungen zur Hangstabilität im Bereich der Burg Schwaneck, Pullach i. Isartal, München.
- [U 50] Müller, L. (1964): Baugeologisches Gutachten über die Standsicherheit des Isartal-Hanges im Bereich der Burg.- Zweiter Bericht vom 24. März 1964.
- [U 51] 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 52] Floss, R. (1999): „Bürgerbräuterrassen“, Pullach im Isartal.- Prüfbericht vom 20. April 1999.
- [U 53] Jung, R.G. (2003): Gutachten zum Beweisbeschluss des Landgerichts München I vom 28.8.2002, Habenschadenstraße 13.- 23. Mai 2003.
- [U 54] Landesamt für Umwelt LfU (2004): Erneuerung einer DHH, Habenschadenstraße 13 in Pullach (Anwesen Poetis); Standsicherheit des Isarhangs.- Stellungnahme Dr. Baumann, 15.11.2004.
- [U 55] Udluft, P. (1982): Baugrundgeologisches Gutachten für das Grundstück Fl.Nr. 40/5 an der Habenschadenstraße 29 in Pullach/Isartal.- Gutachten von 1982.
- [U 56] 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 57] Elbracht, J. (2002): Karbonatische Zementation pleistozäner Lockersedimente NW-Deutschlands.– unveröffentlichte Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften und Geographie der Universität Hannover, 214 S.; Hannover.
- [U 58] Klein S. (1940): Die Nagelfluhbildungen im Eiszeitalter. – Zentralblatt für Mineralogie etc., **10**: 289-306; Stuttgart.
- [U 59] Vogt, N. (2014): Gutachterliche Beurteilung der Hangstabilität, Wohngebäude Habenschadenstraße 8. – Gutachten, Zentrum Geotechnik TU München, 11.06.2014.
- [U 60] Baumann, J. & Galleman, T. (1993): Standsicherheit des Isarhangs im Bereich Habenschadenstraße 33-35, Pullach.- Geotechnische Stellungnahme vom 7.12.1993.

Weitere Literatur und Internetquellen:

- [U 61] <http://www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen/ Gefahrenhinweiskarten/index.htm> [Abgerufen am 24.08.2015]
- [U 62] Hack, R. (2000): Geophysics for slope stability. – Surveys in Geophysics, 21: 423-448.

2 Methodik und Untersuchungen

Im Folgenden werden die von unserer Arbeitsgruppe durchgeführten Untersuchungen und Arbeitsmethoden in Grundzügen dargestellt.

2.1 Geologische Kartierung

Die Kartierarbeit fand i.W. von Ende 2013 bis 2014 statt. Sie 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 ein Schwerpunkt auf dem Vorkommen von Nagelfluh und Flinz-Aufschlüssen. Ersteres ist maßgebend für die Stabilität des gesamten Hanges und gleichzeitig 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 im Rahmen dieser großräumigen Aufnahme jedoch nicht gesondert darstellbar. Der Fokus bei der Festigkeit bzw. Entfestigung des Konglomerates wurde indes auf Trennflächen mit mittel bis sehr großen Kluffkörpern und überhängenden Felswänden gelegt, die in der geologischen Karte hervorgehoben sind.

Die absolute Höhe des Flinz ist ein wichtiger Faktor für Stabilitätsbetrachtungen und ein stratigraphisches Einordnungsmerkmal für die gesamte Schichtfolge. In der Regel ist der Flinz nicht direkt anstehend, kann aber durch Quellaustritte und Vernässungszonen eingegrenzt werden. Die Lokalitäten und Höhen wurden, falls möglich, exakt bestimmt und in die Karte übernommen.

Weiteres zu dokumentierendes Hangbewegungsinventar sind Abbruchkanten und Nackentälchen, defekte und intakte Hangsicherungen, anthropogen überprägte Flächen und natürlich die abgelagerten Sturz- und Rutschmassen. Diese Relikte, auch stumme Zeugen genannt, sind bei der weiteren Auswertung ein wichtiger Hinweis bei regionaler Differenzierung und Analyse der Aktivität.

Daneben wurden weitere Daten in den unterschiedlichen Kartensätzen zusammengestellt, wie die im Rahmen der Recherche ermittelten zu geologischen Sondierungen, die lagegetreu übernommen wurden.

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 Galleman vom LfU sowie dem Gemeindecarchivar von Pullach, Herrn Erwin Deprosse, und dem langjährigen Kenner der Isarhänge, Herrn Dr. Jürgen Baumann, zur Verfügung gestellt.

Die Recherche beinhaltet Bestandsdaten wie ausgewählte Baugrundgutachten, Stellungnahmen, 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 in den Karten 1:1.000 eingetragen. Gleiches gilt für die Messeinrichtungen. 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 5.7 zu finden.

2.4 Installation von Deformationsmessungen

Insgesamt wurden vier **Konvergenzmesstrecken (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 einem digitalen Bandextensometer durchgeführt (Abb. 3), dessen Messband zwischen zwei Fixpunkten gespannt wird und die Entfernung auf $\pm 0,01$ mm genau bestimmen kann. Die Fixierung erfolgt mit Hilfe von Schraubankern, welche an Fels oder eigens eingerammten Holzpflocken angebracht sind. Die Messpunkte wurden so gewählt, dass das gewünschte Messprofil in gleichmäßige Segmente unterteilt wird. 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 April 2015 wurden die Messprofile im Abstand von ca. zwei Monaten überprüft, danach wurde auf jährlichen Messrhythmus umgestellt. Neben den Entfernungen werden die Niederschlagsmengen und die Temperatur am Messtag dokumentiert, da diese sich auf Stahlband und Messgerät auswirken und Korrekturen durchgeführt werden müssen. Die Wetterdaten werden dabei 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 vornimmt und einen Vergleich der relativen sowie der absoluten Bewegungen und der Bewegungsraten ermöglicht (siehe Anlage 2).

Außerdem wurden z.T. schon vor mehreren Jahren sogenannte **Kluft- oder Mauerspione** eingerichtet, die Abstände entlang natürlicher Klüfte im Konglomerat oder von Rissen in Fundamenten und Mauerwerk einmessen. Die Messintervalle sind unregelmäßig, reichen aber z.T. 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: Links: Gespanntes Extensometer an der KVM 1/8 mit Blickrichtung Werkkanal; Beispiele von Mauer- und Kluftspionen, Mitte: P3 Habenschadenstraße 17 (seit 2013), rechts: M1, Konglomeratüberhang am Treppenweg (seit 2005).

2.5 Recherche zu Sparten und Infrastruktur

Für Sondierungen oder geoelektrische Messungen ist eine genaue Kenntnis von Sparten erforderlich. Dazu haben wir für das gesamte nördliche Arbeitsgebiet (Burgweg bis Kalkofenweg) sowie den südlichen Joseph-Breher-Weg eine umfassende Spartenrecherche bei lokalen Versorgern durchgeführt. Diese Unterlagen können für Bauprojekte oder zur Planung zu erstellender Baugrundaufschlüsse herangezogen werden. Folgende Spartenträgerskizzen liegen für das Jahr 2016 vor:

- Telekom
- VBS Kommunalunternehmen (Wasser, Abwasser, Glasfaser)
- SWM Stadtwerke München (Strom, Wasser, Gas, Fernwärme)
- Kabel Deutschland
- Bayernwerk (Strom, Steuerkabel)

2.6 Elektrische Resistivitätstomographie (ERT) des Isarhangs

In Kooperation mit dem Fachgebiet Hangbewegung der TU München (Prof. M. Krautblatter) wurden fünf geoelektrische Transekte (Elektrische Resistivitätstomographie ERT, kurz Geoelektrik) quer zum Isarhang erstellt. Die Profile ziehen senkrecht auf dem Hang nach unten, die steilen Bereiche wurden im Abseilen überbrückt. Sie dienen als **zusätzlicher und methodisch neuer Erkundungsansatz** zur Erstellung eines hochauflösenden geologischen Modells. Die Methode wird hier zum ersten Mal eingesetzt.

Tab. 2: Geoelektrische ERT Profile am Pullcher Isarhang (2015 bis 2016).

Geoelektrisches ERT Profil	Messzeitraum
Transekt 1 – Burgweg	Oktober 2016
Transekt 2 – Heilmannstraße 10	Oktober 2016
Transekt 3 – Habenschadenstraße 1	Oktober 2016
Transekt 4 – Habenschadenstraße 35	Oktober 2016
Transekt 5 – Hochleite	Oktober 2015

Bei der ERT wird basierend auf dem Ohm'schen Gesetz der elektrische Widerstand an Hunderten von Vier-Elektrodenkombinationen mit jeweils zwei Strom- und zwei Potentialelektroden gemessen. Mittels des geometrischen Faktors der Vierelektrodenanordnung werden die elektrischen Widerstandswerte in scheinbare (material)spezifische Widerstände des Untergrundes umgewandelt. Mit Hilfe der gemessenen Topographie wird in einem Inversionsprogramm (RES2DInv) aus der Verteilung der scheinbaren Widerstände eine

Untergrundtomographie der spezifischen Widerstände ermittelt. Die spezifischen Widerstände unterscheiden 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. Dabei wurden Wenner- und Schlumberger-Arrays unabhängig voneinander gemessen, um aus zwei unterschiedlichen Datensätze vergleichbare Tomographien zu produzieren und zu vergleichen.

Die Länge der Profillinien ist durch Werkkanal einerseits, oder Bebauung, Straßen und S-Bahnlinie andererseits begrenzt. Entlang der Profillinien wurde ein spezielles Messkabel verlegt, sodass im Abstand von 5,0 m jeweils Edelstahlnägel als Elektroden in Boden und Fels eingebracht werden konnten. Die Steuerung erfolgte mit dem ABEM Terrameter SAS 1000 und wurde mit 100 mA gemessen. Das Gerät erkennt bei der Messung die Wechselstromeinflüsse, die von Kabeln im Untergrund ausgehen, und kann diese aus der Messung herausfiltern.



Abb. 4: Links: Steuereinheit der Multielektrodenanlage. Rechts: Kabelauslage auf der Hangschulter (Transekt 1 – Burgweg).

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 5 m entlang der Profillinie mit einem

analogen Neigungsmesser die Topographie gepeilt. Für die Darstellung der Widerstände im Untergrund wertet das Programm die Ergebnisse der Messung aus und interpoliert zusätzlich zwischen den Messpunkten, so dass ein vollständiges Profilbild entsteht. 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 der Literatur entnommene Tabelle [U 62]:

Tab. 3: Spezifische Widerstände der Gesteine im Untergrund von Pullach [U 62], die als erster Interpretationsansatz dienen und später bei unserer Auswertung spezifiziert werden.

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

2.7 Bodenkennwerte – Literaturstudie und ergänzende Analytik

Im Zuge der Bestandserfassung wurden Kennwerte der Boden- und Felsschichten aus verschiedenen Quellen zusammengestellt (Kapitel 5.7).

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

Korngrößenverteilung des rutschenfähigen Materials mittels kombinierter Sieb-/Schlammanalyse nach DIN 18123-5/-6.

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

In-Situ **Lagerungsdichtenbestimmung** bis maximal 12 m Tiefe mittels leichter Rammsonde (DPL-5) und schwerer Rammsonde (DPH) (DIN 4094-3).

Die Parameterstudie mündete schließlich in der Definition charakteristischer Boden- und Felskennwerte (siehe Kap. 5.7).

2.8 Studie zu erdstatischen Berechnungen

In der Vergangenheit wurden im Rahmen von Planungen und Sanierungen erdstatische Berechnungen (Standicherheits- und Böschungsbruchberechnungen) von verschiedenen Instituten durchgeführt. Zu nennen ist beispielsweise die umfangreiche Begutachtung im Zuge des Baus des Bürgerhauses [U 51]. Auch durch unser Büro wurden Berechnungen an mehreren Profilen durchgeführt, beispielsweise im Vorfeld von Schwertransporten, seismischen Untersuchungen etc. (siehe Tab. 4). Erkenntnisse daraus werden in Kapitel 6.5 zusammengefasst und in eine Interpretation übernommen, ebenso wie die Modellierungen und Berechnungen anderer Bearbeiter (z.B. [U 23] [U 59]). Außerdem anzuführen sind die exemplarischen Untersuchungen von Daniel Davies im Rahmen seiner Masterarbeit [U 31].

Tab. 4: Zusammenstellung durch BBB berechneter geotechnischer Querprofile.

Geotechnische Querprofile	Projekt-Nr.	Zeitraum
Geotechnisches Profil Georg-Kalb-Straße, Großhesselohe [U 13]	03183	2014
Geotechnisches Profil Kirchplatz 1 [U 12]	02863	2014
Geotechnisches Profil 350 Habenschadenstraße 11 [U 8]	02675	2013
Geotechnisches Profil 297 Habenschadenstraße 17 [U 8]	02675	2013
Geotechnisches Profil 250 Habenschadenstraße 21 [U 8]	02675	2013
Geotechnisches Profil 110 Habenschadenstraße 25 [U 3] [U 4]	01103 / 01553	2008/2009
Geotechnisches Profil Kalkofenweg [U 5]	01753	2010
Geotechnisches Profil Habenschadenstraße 7 [U 15]	02863-1	2015
Geotechnisches Profil Heilmannstraße 5 [U 16]	03683	2016

Den Berechnungen, die bis in die 60er Jahre zurückreichen, liegen verschiedenen theoretische Modelle und Berechnungsverfahren zugrunde, beispielsweise Gleitkreisberechnungen im Lamellenverfahren nach Bishop oder Berechnungen polygonaler Gleitflächen nach Janbu. Heutzutage werden Rechenprogramme angewendet, die eine Automatisierung der Berechnung ermöglichen. Die detaillierten Grundlagen zu den von den Bearbeitern herangezogenen Programmen können hier nicht dargestellt werden. Dazu sei auf die entsprechenden Gutachten verwiesen.

Böschungsbruchberechnungen durch unsere Arbeitsgruppe in den vergangenen Jahren wurden beispielsweise mit der Software **GGU Stability 11.08** sowie mit **Slide2D 6.0** gemäß Vorgaben europäischer und deutscher Normen (EC 7, DIN 1054 und DIN 4084) durchgeführt. Jüngere Untersuchungen beziehen sich auf das Teilsicherheitskonzept nach EC 7. Die Ergebnisse werden

dann als Auslastungsgrade μ angegeben. Ältere Untersuchungen geben dagegen noch globale Sicherheiten η an.

2.9 GIS-Einbindung

Die Kartendarstellung 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 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 20] [U 21] [U 22] [U 28] [U 29]) und wird daher nur in den Grundzügen ausgeführt.

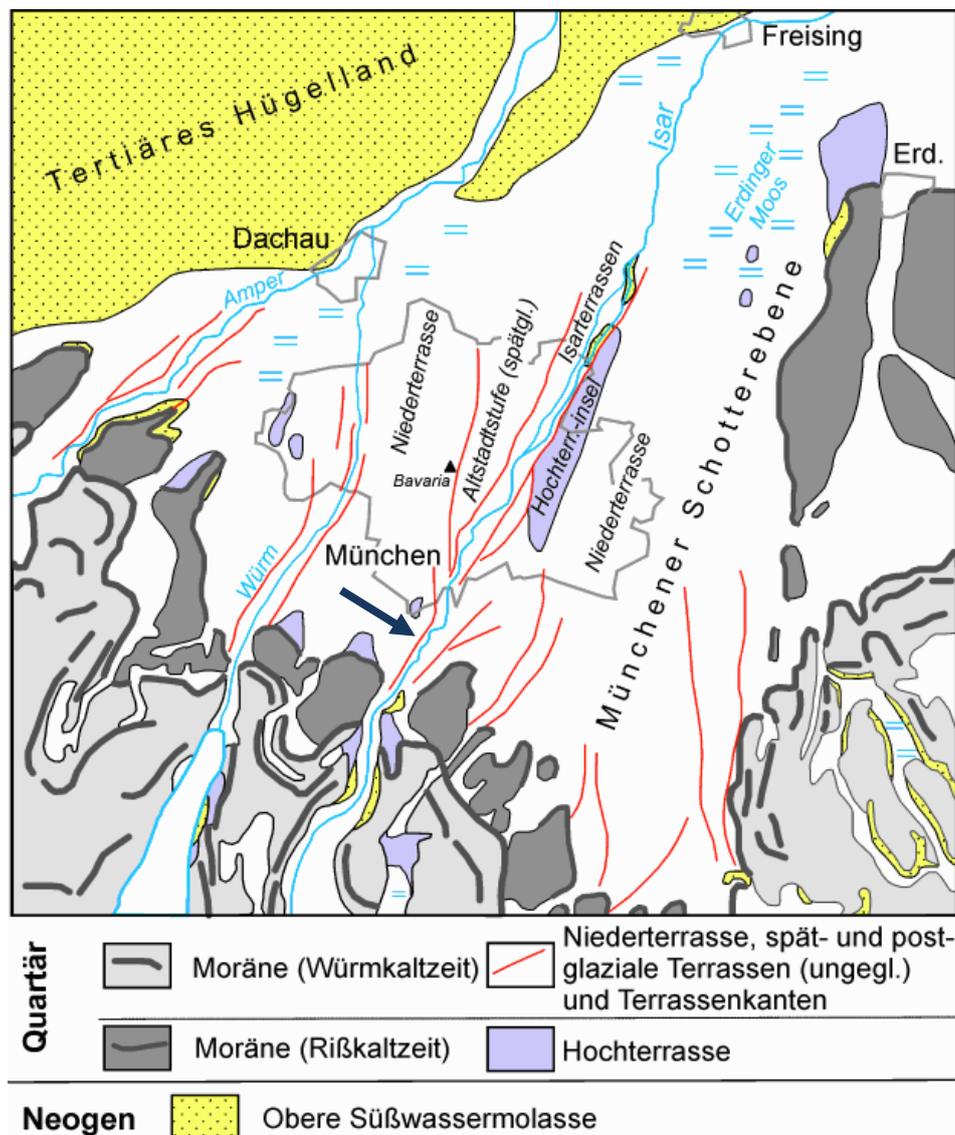


Abb. 5: Vereinfachter geologischer Überblick der Münchener Schotterebene zwischen der südlichen Moränenlandschaft und dem tertiären Hügelland [U 28]. Der dunkelblaue Pfeil zeigt auf das Ortszentrum Pullachs.

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 29].

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.

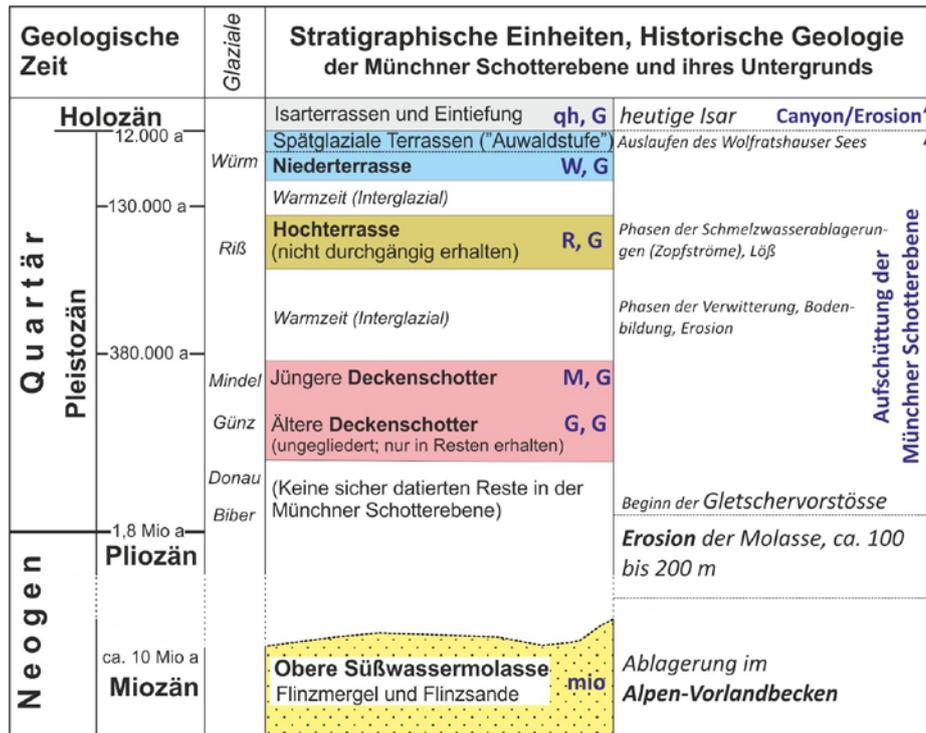


Abb. 6: Erdgeschichtliche Tabelle für München und Pullach (nach [U 28]). Die Abkürzungen bezeichnen die Formationen gemäß amtlichem Kartenblatt von München 1:50.000 [U 20]. Das Isarhochufer in Pullach wird i. W. von dem Flinz (mio) aufliegenden jüngeren Deckenschottern (M, G) und rißzeitlicher Hochterrasse (R, G) aufgebaut.

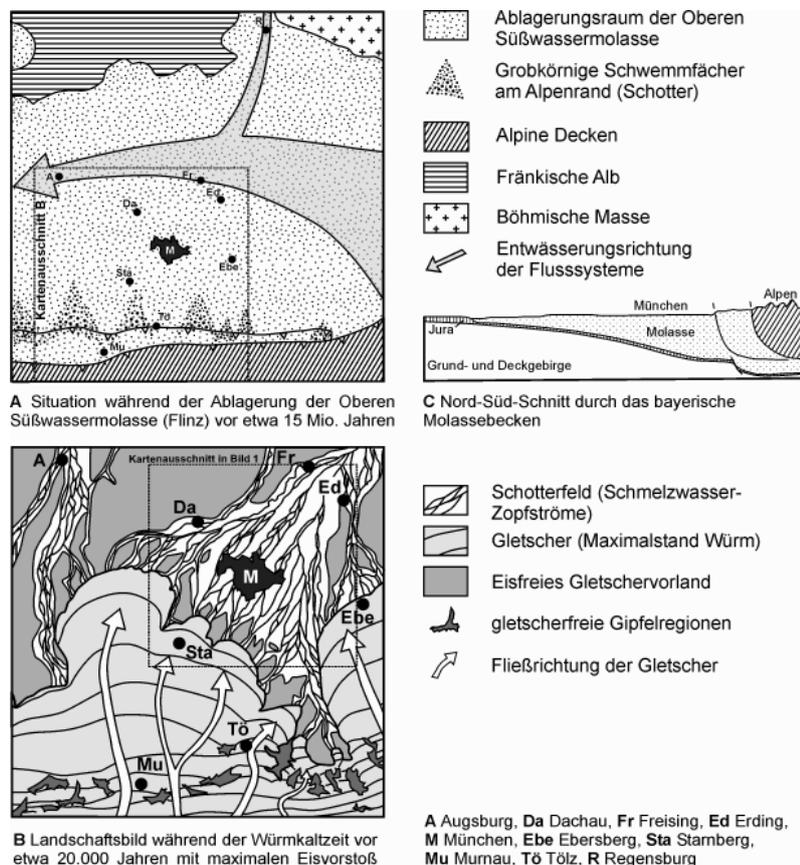


Abb. 7: Paläogeographie Münchens und Pullachs in zwei erdgeschichtlichen Phasen [U 22] [U 28].

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 im Süden Münchens erhalten sind und Mächtigkeiten von wenigen bis 20 m erreichen, unterscheiden sich deutlich voneinander, was geotechnische Auswirkungen hat (Mächtigkeiten, Zusammensetzung, Verwitterungs- und Verfestigungsgrad. Die Terrassenabfolge nach Alter und stratigraphischer Position ist in Abb. 6 dargestellt.

Generell gilt in der weiteren Umgebung von München, dass die Deckenschotter als älteste Terrassen oftmals horizontweise 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.

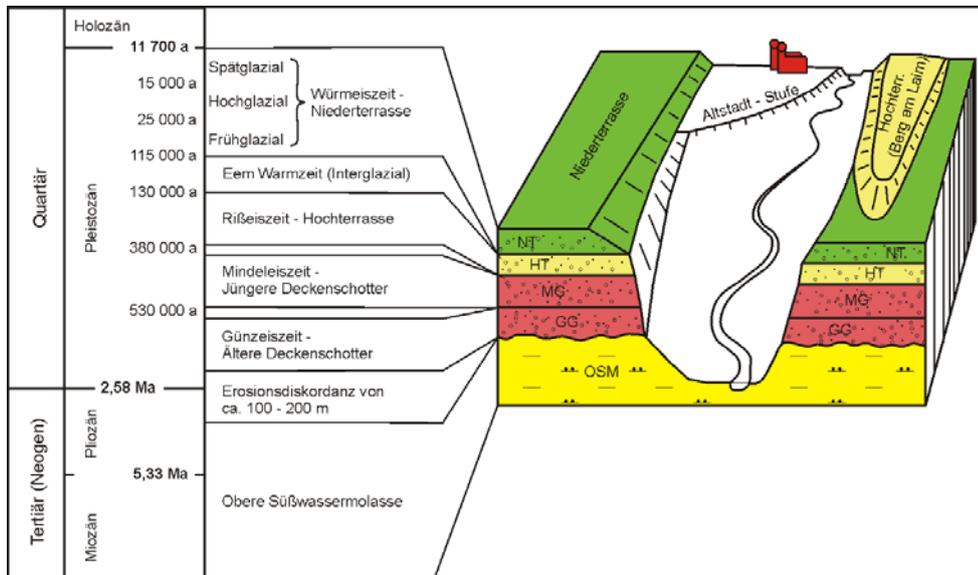


Abb. 8: Stratigraphie des Pullacher Untergrundes mit dem tief eingeschnittenen Isartal und der Verflachung im Stadtgebiet von München (aus [U 22]).

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.

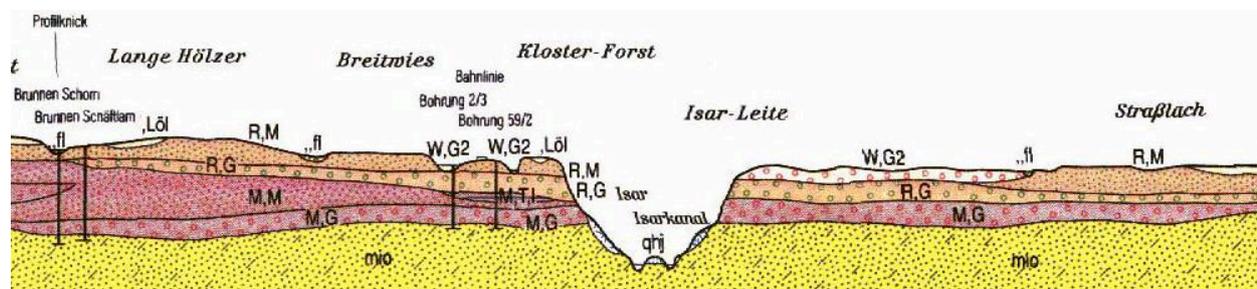


Abb. 9: Profilschnitt durch den Isartal-Canyon südlich von Grünwald / Pullach (Ausschnitt aus der amtlichen geologischen Karte 1:50.000 [U 20]), 5-fach überhöht.

Die junge Geschichte des Isartals im Süden Münchens ist auch mit der Entwicklung des ehemaligen Wolfratshauer Sees verbunden. Nach Rückschmelzen des Eises entstand, von der Isar gespeist, zunächst der damalige Tölzer See und gemeinsam mit der Loisach der Wolfratshauer 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 22]. 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 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 in vielen Abschnitten 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 28]. Der Bau des Isarwerkkkanals mit seinen Dammbauwerken stellt hingegen für das westliche Hochufer einen 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 nachweislich spätestens seit dem 17. Jahrhundert im technischen Bewusstsein. So musste auf der rechten Isarseite beispielsweise zwischen 1670 und 1694 wegen einer drohenden Hangrutschung die Grünwalder Burg teilweise abgerissen und umgebaut werden [U 31]. Die letzten Großrutschungen ereigneten sich mit dem sehr gut dokumentierten und untersuchten Rutschungsvorgang der Jahre 1970 bis 1975 ([U 23] [U 24]). Am Pullacher Isarhochufer finden sich ebenfalls zahlreiche große Rutschschollen, die sich auf ein Alter von einigen Jahrhunderten bis einigen 1000 Jahren 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 47] [U 48] [U 50].

Im Folgenden wird ein Überblick über ausgewählte geologische Untersuchungen der letzten Jahrzehnte im Gemeindebereich Pullachs gegeben (Baugrunduntersuchungen, Sanierungen und wissenschaftliche Bearbeitungen). Erkenntnisse daraus, beispielsweise Bohrdaten, gehen in die Gesamtbetrachtung ein. Grundlagen zu den dokumentierten Hangbewegungen, ihre Klassifizierung und Prozesse werden 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 südwestlich 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 47], eine weitere schließlich durch Prof. Jelinek [U 48]. Der Burgweg wurde schließlich rückverlegt und eine lokale Sicherung der Nagelfluh im Bereich des Anwesens Burgweg Nr. 2 durch Anker und Spritzbeton eingebracht.

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 11 vertikale Bohrungen (PB-1 bis PB-11) bis zu einer Tiefe von knapp 16 m bis in den tertiären Flnz 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.



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 Nordosten (entnommen aus: Baumann 2014 [U 24]).

Eine Begutachtung und Interpretation der Bohrerergebnisse kann dem Gutachten von Müller [U 50] entnommen werden. Müller interpretiert die unterschiedlichen Tiefen der Tertiär-Oberfläche als eine SW-NE 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 1964 eine Dehnung der Hangpartien Richtung Isar und prognostiziert „in naher Zukunft“ ein gleiches Versagen wie im Bereich des Burgweges 1962. Eine überschlüssig 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) erkundet.

Tab. 5: 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).

Aufschlussbezeichnung	Ansatzhöhe [m ü. NN]	Endteufe [m u. GOK]	Bewertung der Lagerungsdichte / Konsistenz
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. 6: Beschreibung der in den Jahren 1962/63 abgeteufte Pegelbohrungen (PB) sowie der 1964/89 abgeteufte Horizontal- und Schrägbohrungen (HB/SB) am Hangfuß im Bereich der Burg Schwaneck. (Quelle: Datenbestand des LfU).

Bohrungsbezeichnung	Ansatzhöhe GOK [m ü. NN]	Teufe [m]	Gauss-Krüger-Koord.		Grundwasser [m ü. NN]	Geologische Erkenntnisse
			Rechtswert	Hochwert		
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 Tertiäroberfläche 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 Tertiäroberfläche 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

Bohrungs- bezeichn.	Ansatzhöhe GOK [m ü. NN]	Teufe [m]	Gauss-Krüger-Koord.		Grund- wasser [m ü. NN]	Geologische Erkenntnisse
			Rechtswert	Hochwert		
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 Tertiäroberfläche 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 Ausbau zur Bohrlochmessstelle	
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	540	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. 7: Ergebnisse der Schweren Rammsondierung an der Hangkante (Heilmannstraße 8) aus dem Jahr 1996, durchgeführt vom Prüfamts für Grundbau, TU München (Quelle: Datenbestand des LfU).

Aufschluss- bezeichnung	Ansatzhöhe [m ü. NN]	Endteufe [m u. GOK]	Bewertung der Lagerungsdichte / Konsistenz
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 $N_{10} \approx 60$

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. Die Kernbohrungen sowie die Rammsondierungen im Hangbereich (DPH 1-7) und eine repräsentative Sondierung am Gebäude (DPH-1/1992) werden im Folgenden angeführt.



Abb. 11: Gründungsarbeiten für das 1996 fertiggestellte Bürgerhaus. Rechts sind Werkkanal und Isar zu erkennen. Blickrichtung Norden (entnommen aus: Baumann 2014 [U 24]).

Tab. 8: 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 $N_{10}=124$.

Aufschluss- bezeichnung	Ansatzhöhe [m ü. NN]	Endteufe [m u. GOK]	Bewertung der Lagerungsdichte / Konsistenz
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 01/1992 Bürgerhaus	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 52] enthalten (Kapitel 6.3.1).

Tab. 9: 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]	Grundwas- ser [m ü. NN]	Geologische Erkenntnisse
NMB 1	582,9	60,0	60,0	542,8	Bis 18 m Tiefe quartäre Schotter mit einer mitteldichten bis dichten Lagerung und teilw. kleinere Nagelfluhbänke ($N_{30}=23-27$, mit der Tiefe ansteigend). Darunter ca. 3,5 m mächtige Nagelfluh, die ab 21,5 m wieder von dicht gelagerten, teilw. verbackenen Kiesen unterlagert wird. Die Tertiäroberfläche bei 535 m ü. NN angetroffen. Es folgt eine Schluff-Ton (mit Harnischen)-Schluff Wechselfolge, bevor nach 56 m glimmerhaltiger Sand ansteht.

Bohrungsbezeichnung	Ansatzhöhe GOK [m ü. NN]	Teufe [m]	vertikale Teufe [m]	Grundwasser [m ü. NN]	Geologische Erkenntnisse
GMB 2	536,3	40,0	22,4	534,6	Bis zur Tertiäroberfläche in 2,3 m Tiefe (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-/Oberbodenaufgabe unterhalb der Terrasse des Rabenwirt-Gebäudes am Kirchplatz 1 ins Rutschen. Die Abrisskante mit einer Länge von knapp 20 m reicht teilweise bis an die Gebäudeterrasse. Das Lockermaterial des großen Hanganbruches wurde ca. 15 bis 20 m hangabwärts transportiert, wobei es den dort verlaufenden Fußweg zur Isar teilweise zerstörte und noch im Steilhang zum Liegen kam. Ein Gutachten durch 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 Konvergenzmesstrecken KVM-2 und -3 dar. Das Foto zeigt die Rutsch- bzw. Transportfläche, die Abrisskante ist durch die Vegetation am Gelände verdeckt. Blickrichtung Nord.

4.4 Habenschadenstraße - Treppenweg - Kalkofenweg

In diesem Abschnitt des Arbeitsgebiets kann eine Reihe an Baugrund-, Sanierungs- und Gefährdungsgutachten von Nord nach Süd 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 53] (Tab. 10).

Tab. 10: Ergebnisse der Kernbohrung BK-1 und der Schweren Rammsondierungen (DPH1-3) hangseitig des Anwesens Habenschadenstraße 13 [U 53].

Sondierungsbezeichnung	Ansatzhöhe 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-/Oberbodenaufgabe der Nagelfluh ins Kriechen und führte zu Deformationen in den Gartenterrassen der beiden Grundstücke. Ein ausführliches Gutachten von BBB liegt vor [U 11]. Die Erkundung erfolgte auf Basis einer Detailkartierung des Hangs sowie mit fünf Handbohrungen, welche die dicht gelagerten Kiese bzw. schwach lithifiziertem Schotter, die oberflächennah anstehen, erschlossen. Des Weiteren wurden 2013 an den Rissen der Gartenterrassen vier Kluftspione (P1-P4) installiert. Das bisher letzte Monitoring wurde im Juli 2016 durchgeführt und zeigt innerhalb des dreijährigen Messzeitraumes keine bedeutenden Bewegungen (Kapitel 6.3.2).

Eine Sanierung des obersten Hangs im Terrassenbereich 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 Erdnägeln 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. 11). 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 2016 keine bedeutenden Bewegungen aufzeichneten (Kapitel 6.3.2).

Tab. 11: Ergebnisse der Handbohrungen im Oberhang und der KRB am Hangfuß bei Habenschadenstraße 23-27 [U 3].

Bohrungsbezeichnung	Ansatzhöhe 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 bei 25 m an.

Habenschadenstraße 29

Für den Neubau eines Doppelhauses wurden 1982 neun 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 55]. Schurfbeschreibungen zeigen geringe Zementationsspuren in den oberen Metern der Kiese.

Habenschadenstraße 33-35 (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 46]. Zudem erkundete das LfU 1991 mittels sechs Leichten Rammsondierungen das Grundstück Haus-Nr. 35 auf dem Hochufer sowie in zwei Querprofilen mit je sieben Rammsondierungen den Hangfuß (Profil bei Haus-Nr. 33 und bei Haus-Nr. 35).

Im Jahr 1992 wurden schließlich zwei Schrägbohrungen am Hangfuß durch das LfU durchgeführt und mit Stangenextensometern bestückt. Die kontinuierliche Messung in der nördlichen Messstelle wurde 2013 eingestellt [U 49] (Kapitel 6.3.1). Die südliche Messstelle wird aktuell noch weitergeführt.

Tab. 12: Ergebnisse der Rammkernbohrungen an der Habenschadenstraße 33 im Bereich der Hangkante und am Hangfuß (Quelle: Datenbestand des LfU).

Bohrungsbezeichnung	Ansatzhöhe 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 vereinzelt 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 Nebengemengteilen, teilw. Kalkkonkretionen

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. 13: Ergebnisse der Handbohrungen im Oberhang am Brückenweg sowie der Schwere Rammsondierungen am Hangfuß [U 6].

Bohrungsbezeichnung	Teufe	Geologische Erkenntnisse
HB 1 bis -12	bis >2 m	Sondierungen im Oberhang mit geringmächtigem Verwitterungsschutt auf dicht gelagertem, zum Teil 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)

Im Jahr 2017 wurde Projektbereich neu begutachtet und das Baugrundmodell aktualisiert [U 19].

4.6 Grünwalder Brücke

Der westliche Isaruferabschnitt vom Kalkofenweg bis zur Grünwalder Brücke 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 27] [U 31]). Im Fall der Pullacher Seite kam es

beispielsweise 1942 zu einer sekundären Rutschung an einer älteren Rutschscholle und zur Zerstörung einer Wasserleitung nahe dem Jaiserbrünnel. Ein großer und aktiver sowie detailliert vom LfU untersuchter Rutschbereich tritt im Bereich der Grünwalder Brücke auf. Hier sind für den Brückenneubau 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 24] [U 25] [U 27]). 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 27] [U 23] [U 24] [U 25]).

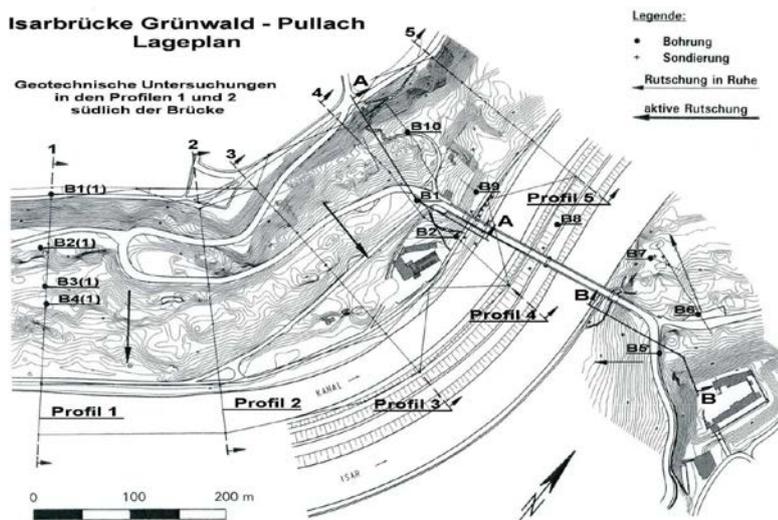


Abb. 13: Überblick über die Erkundung im Widerlagerbereich der Grünwalder Brücke (entnommen aus: Baumann 2014 [U 24]).

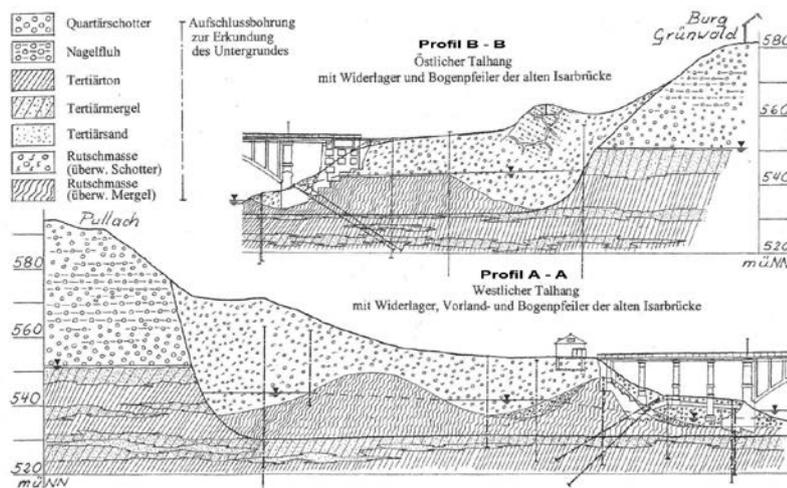


Abb. 14: Geologisch-geotechnische Profile mit Darstellung der alten Grünwalder Brücke (entnommen aus: Baumann 2014 [U 24]).

4.7 Geowissenschaftliche Bearbeitungen

Der vorliegende Geo-Atlas basiert auf den detaillierten Kartierergebnissen der Masterarbeit von Daniel Davies [U 31]. Neben den oben erwähnten gutachterlichen Stellungnahmen wurden auch weitere wissenschaftliche Bearbeitungen im Rahmen von Bachelor- und Master-Arbeiten bis hin zu Promotionen im weiteren Projektgebiet durchgeführt. Zu nennen sind hier Baumann (1988) [U 23], Biersack 2008 [U 31], Scherzer 2009 [U 33], Starace 2009 [U 34] und Steinsdörfer 2009 [U 35].

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

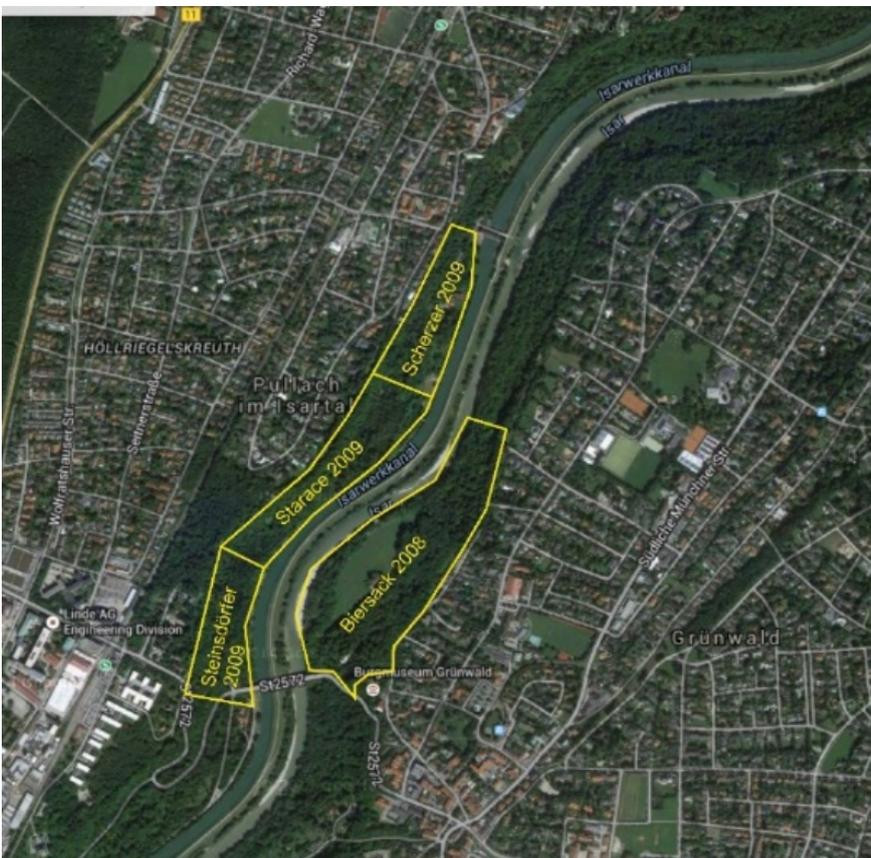


Abb. 15: Überblick der wissenschaftlichen Bearbeitung durch Studienabschluss-arbeiten am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU München.

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, Flnz 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 vielen 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 und Schottern der jüngeren Kaltzeiten aufgebaut. 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 als verfolgbares Band Nagelfluh-Fels aus der Vegetation hervor. Es handelt sich um Felsnasen und senkrechte Felswände von wenigen bis maximal 8-10 m Höhe. Diese werden von Nagelfluh unterschiedlichen Verfestigungs- und Verwitterungsgrades aufgebaut. Viele der Felsbereiche wurden in dieser und früheren Bearbeitungen im Detail kartiert [U 5] [U 12].

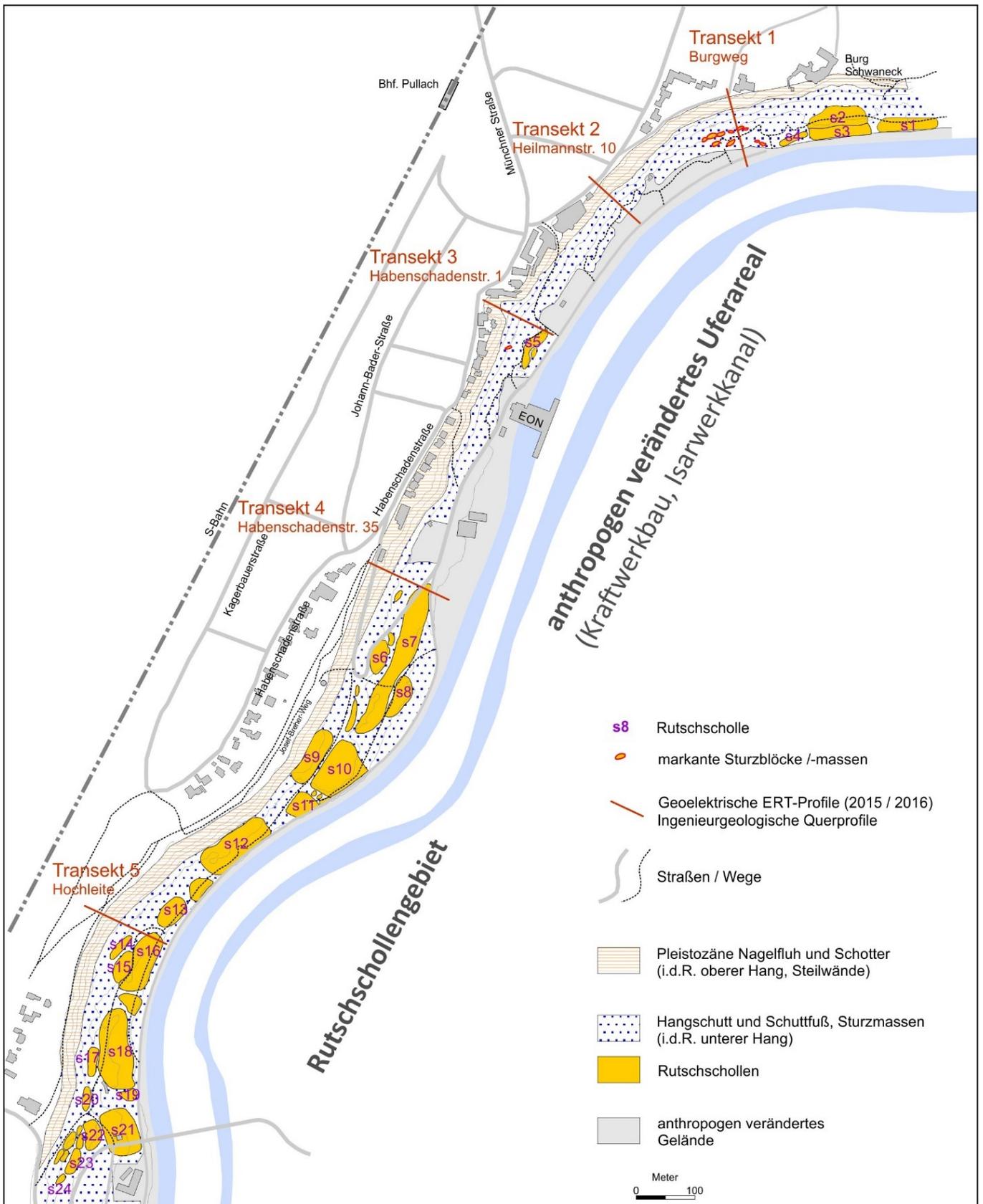


Abb. 16: Vereinfachte geologisch-morphologische Übersicht des Isarhochufers im Gemeindebereich Pullach. Die Transekte 1 bis 5 zeigen die Lage der geoelektrisch gescannten Hangprofile (ERT), die auch gleichzeitig den ingenieurgeologischen Querprofilen dieser Arbeit (siehe Anlage 1.7) entsprechen (unmaßstäblich).

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 Terrassenschotterns 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.

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 vereinzelt Konglomerat-Einschaltungen, von 15 m bevor die neogenen Feinsedimente erbohrt wurden (Tab. 6). Inwieweit es sich um Hangschutt oder aber anstehende Terrassenschottern handelt, ist allerdings nicht differenziert.

Der die quartären Sedimente unterlagernde neogene Flinz ist nur selten an der Geländeoberfläche aufgeschlossen (Tab. 14), die detailliertesten Beschreibungen stammen aus Bohrdaten.

5.2 Geologisch-geotechnische Stratigraphie

Folgende Gesteins-/Schichttypen 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 indirekten Hinweis geben (z.B. unterhalb Bürgerhaus). In Tab. 14 sind die wenigen Aufschlüsse des Neogen an der GOK zusammengefasst und kurz beschrieben.

Tab. 14: 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 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. Die weitere Untergliederung der Nagelfluh nach verschiedenen Festigkeitsgraden wie andernorts (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. Zementation/Verbackung kann fehlen oder in sehr unterschiedlichem Grad auftreten, wie vor allem Bohrergergebnisse verdeutlichen (z.B. Bohrung NMB-1 am Bürgerhaus u.a.). 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. 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 27] zusammen, und kann wie schon erwähnt beispielsweise unterhalb der Burg Schwaneck bis 15 m erreichen, lokal auch mehr [U 27].

Tab. 15: 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 organischem 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 genau im Nagelfluh-Horizont 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.

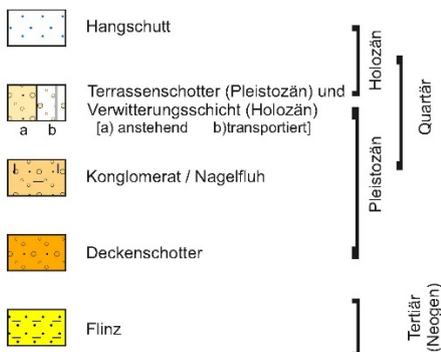


Abb. 20: Ausschnitt der Legende zur geologischen Kartierung mit den Haupteinheiten (geotechnische Homogenbereiche).

5.3 Zementation und Verwitterung

Prozesse der Lithifikation in glazialen Schotterterrassen

Die Verfestigung (Lithifizierung) der quartären Schmelzwasserschotter zu Konglomerat ist nach Lempe [U 56] maßgeblich durch Verwitterungsprozesse bestimmt. Durch chemische Verwitterung reichert sich Sicker- und Grundwasser mit Karbonat an. Dies wiederum ist Voraussetzung für die Ausfällung von Calcit, was sowohl in der vadosen (wasserungesättigten) wie auch phreatischen (wassergesättigten) Zone geschehen kann. Somit kommt es bei der Verwitterung nicht nur zu einer Entfestigung, sondern umgekehrt auch zu neuer Zementation.

Beiden Prozessen liegt das Kalk-Kohlensäure-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 Kohlenensäure (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 CO₂-Gehaltes zu einer Lösung von Karbonat, eine Abnahme des CO₂ zu einer Ausfällung von Karbonat. Diese Änderungen im CO₂-Gehalt werden überwiegend hervorgerufen durch: Eintrag von CO₂ durch Niederschlag, Verdunstung von Wasser, als Produkt von Stoffwechselfvorgängen der im Boden lebenden Organismen, die temperatur- und druckabhängige Löslichkeit von CO₂ im Wasser [U 57].

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 56]. Des Weiteren unterscheidet Lempke 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 laut Lempke 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 verstärkten Verfestigung durch die Änderung der Druck- und Temperaturverhältnisse und des CO₂-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 58]. Nochmals hervorgehoben sei die größere Mächtigkeit der lithifizierten Schotter im Nahbereich von Einschnitten (2. Zementationsphase nach [U 56]). 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.

Erkenntnisse zur Nagelfluh und Verfestigung im Gemeindebereich Pullach

Die folgende Abbildung zeigt einen typischen Aufschluss von Nagelfluh in Pullach. Sie bildet mehrere Meter hohen Felswände mit schwankendem Zementations- und Verwitterungsgrad. Mürber wie auch harter Fels können auftreten, ebenso wie lagenweise unverfestigte, rollige

Lagen. Die Felswände sind kompakt bis weitständig geklüftet, lokal kann auch stärkere Zerbrechung auftreten.



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.

Diese im Schnitt 4-8m mächtig erschlossene Nagelfluhplatte lässt sich fast ununterbrochen im gesamten Hang verfolgen. Sie nimmt in Pullach Bereiche der oberen Deckenschotter, eventuell auch der Hochterrasse, ein. Es handelt sich dabei um Verfestigung aus Phase 1, die die Schotter flächenmäßig erfasst hat und auch im Untergrund Pullachs, und somit nicht nur im Hangbereich, zu verfolgen ist. Im Unterschied zur Annahme von Lempe, ist der Zementationsgrad jedoch vergleichsweise hoch. Diese Erkenntnisse sind belegbar in Bohrungen zur Erkundung der Versickerungsfähigkeit von 2009 (siehe [U 14]), in denen harte und kompakte Nagelfluh in exakt korrelierendem Tiefenbereich erkundet wurde, oder auch in Bohrung NMB-1 am Bürgerhaus. Auch Quertäler zeigen die weite Verbreitung dieser Nagelfluhplatte, wie z.B. im Carusoweg (Wenzsiedlung) [U 17].

Darüber hinaus kann in den Schottern der überlagernden Hoch- und Niederterrasse zum Teil starke Zementation nachgewiesen werden, in Bohrungen oder auch durch Kartierung nachweisbar. Diese Verfestigung jedoch ist lokal unterschiedlich und nicht über weite Strecken korrelierbar. Hier dürfte es sich im Wesentlichen um den als Phase 2 beschriebenen

Konglomerierungsprozess handeln. Dies gilt auch für die älteren Deckenschotter im Liegenden der Nagelfluh.

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, mehr oder weniger homogener Grundwasserleiter (GWL) und die tertiären Sande und Kiese als unterer, differenzierter GWL mit häufig gespannten Grundwasserverhältnissen. Beide GWL sind in weiten Bereichen durch eine Mergelschicht, die als Grundwassernichtleiter fungiert, getrennt [U 28]. 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).

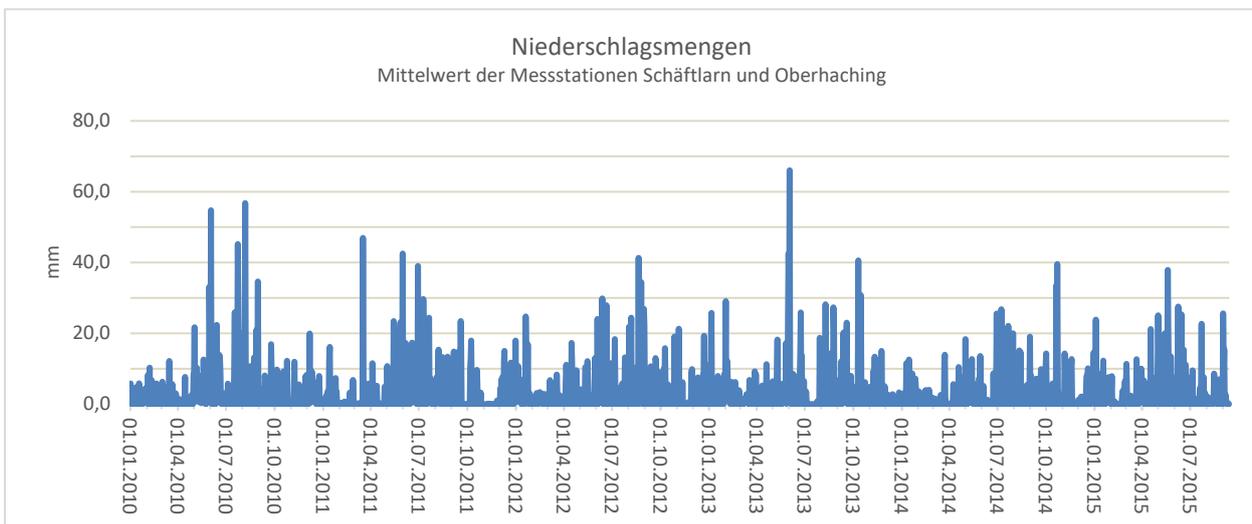


Abb. 22: Niederschlagsmengen (Tageswerte in mm) für die Gemeinde Pullach im Zeitraum Jan. 2010 bis Sept. 2015, gemittelt aus den Wetterstationen Kloster Schäftlarn (557 müNN) und Oberhaching-Laufzorn (604 müNN) [WESTE-XL Daten des DWD].

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 46]. 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 mäßige bis geringe Durchlässigkeiten von $k_f = 10^{-4}$ bis 10^{-6} m/s angegeben.

An den 1962 abgeteufte 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.

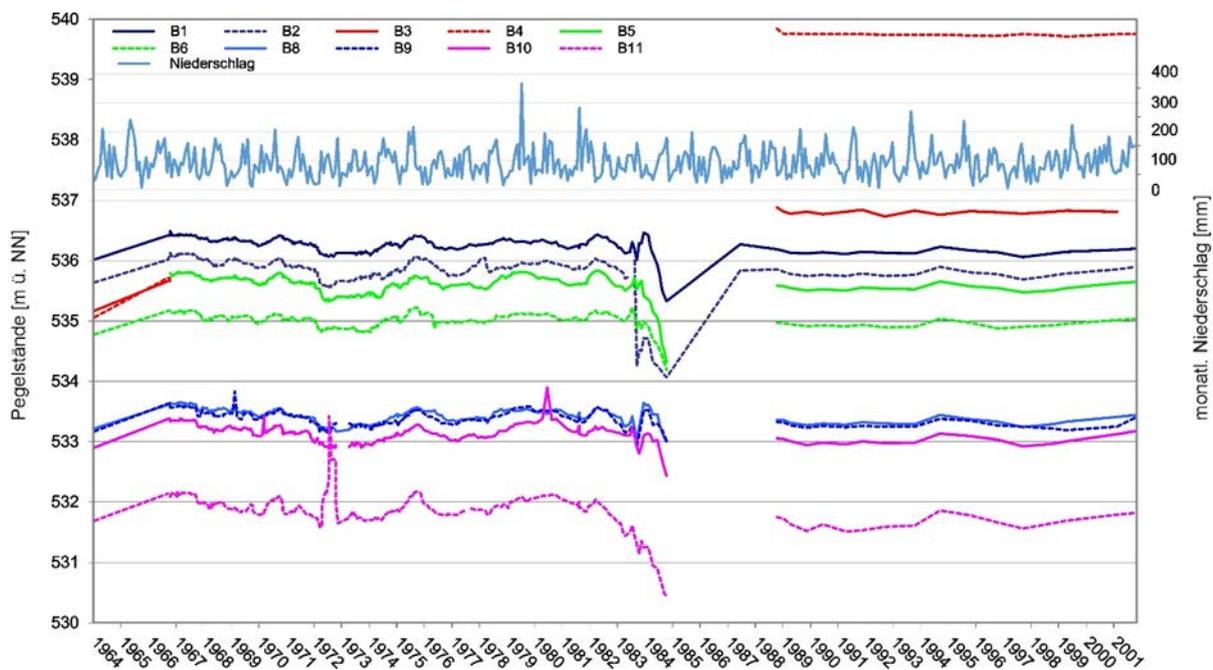


Abb. 23: Grundwasserstände von 10 Pegelbohrungen am Hangfuß unterhalb der Burg Schwaneck zwischen 1964 bis 2001. Zudem sind die monatlichen Niederschlagsmengen dargestellt (Quellen: Pegelstände (Bayerisches Landesamt für Umwelt), Niederschlagsmengen (Deutscher Wetterdienst)).

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 südlich 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. 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.

Quellfassungen am Hangfuß in Pullach sind auf den geologischen Kartenblättern 1:1000 in Anlage 1.1 und Anlage 1.2 verzeichnet.

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 können. 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 22]). 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. 16).

Tab. 16: Ergebnisse Vorläufiger Katalog dokumentierter historischer Hangbewegungsereignisse seit dem 20. Jahrhundert).

Versagensprozess (nach Kapitel 6.1)	Datum	Lokalität (Gauss-Krüger)	Beschreibung
Felssturz oder Rutschung	1908, 1924, 1935	-	Schäfer [U 47] 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 35]
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 47] [U 48], 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 27]
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 der anstehenden Nagelfluh. Die Rutschmassen kommen nach ca. 40 m auf Hangschutt zu liegen. (Quelle: Bayernatlas, Objekt-ID: 793GR015002)
Hanganbruch	1995	Habenschaden-Str. 17	Rutschung/Sturz von entfestigtem Konglomerat und Hangschutt
Felssturz	22./23. Jan. 2003	4.463.976/ 5.323.329	Stürzen/Abbrechen eines ca. 60 m ³ großen Nagelfluhspornes an der Hochleite, S' des Jaiserbrünnerls (mündl. Mitt. Herr Deprosse)
Rutschung	25. Nov. 2003	4.464.459/ 5.324.032	Sturz von ca. 2 m ³ 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 m ³ Nagelfluh und Lockermaterial auf den Treppenweg, erste Bewegungen bereits Ende November 2007 [U 3], [U 35]
Hanganbrüche	Mai 2013	4.464.465/ 5.324.026	2 Rutschungen von mehreren m ³ Lockermaterial auf den Treppenweg [U 9]
		4.464.468/ 5.323.986	
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 Schuttalagerungen am Kalkofenweg [U 10]

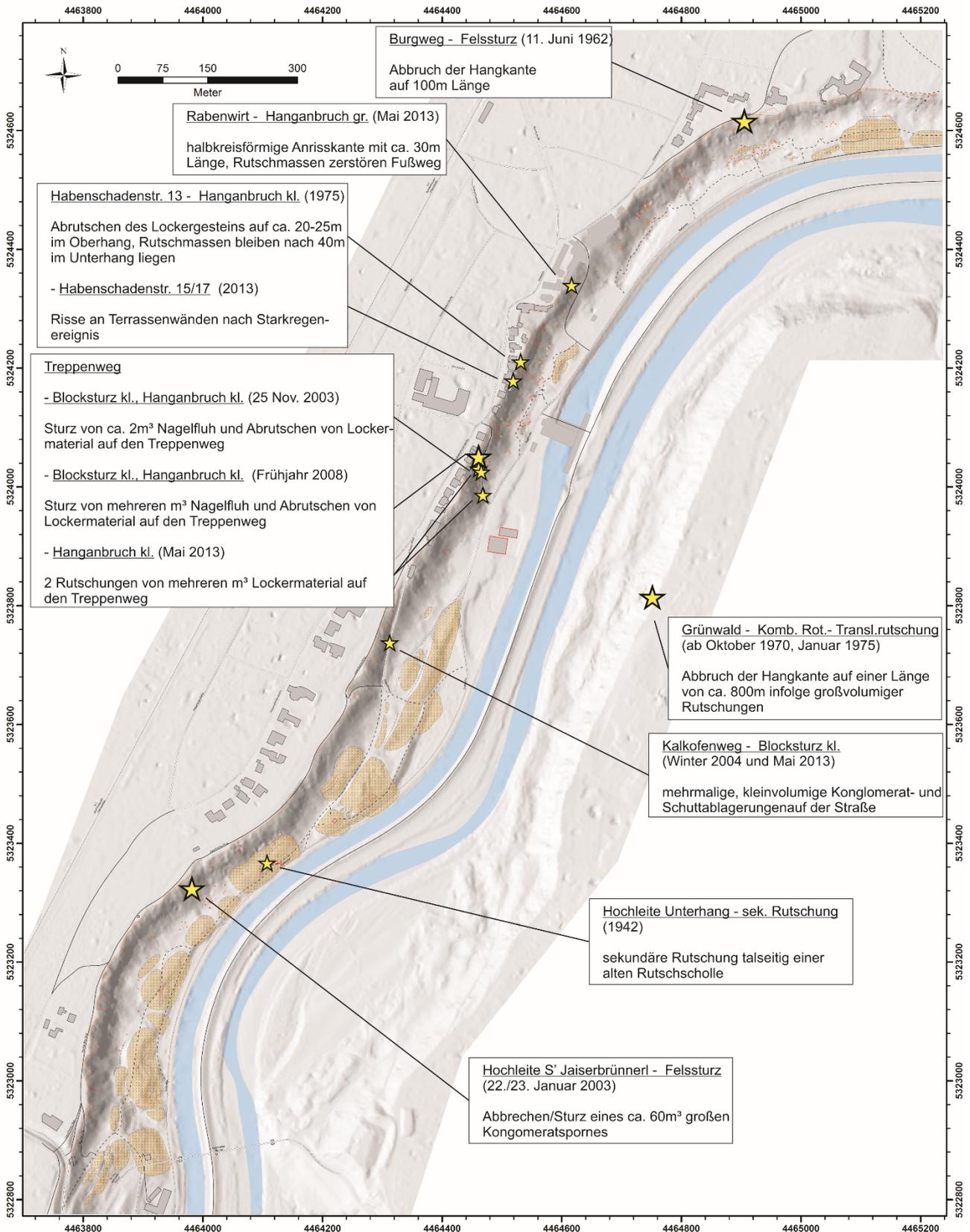


Abb. 25: Übersichtskarte dokumentierter Massenbewegungen im Projektgebiet seit 1940, die zeitlich und räumlich zugeordnet werden konnten.

Bei der gewählten Klassifizierung der Massenbewegungen nach Art und Volumen wurde versucht gängige Klassifizierungen heranzuziehen wie sie auch von öffentlichen Stellen (LfU) verwendet werden. 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 z.B. entlang der Habenschadenstraße und weiter nach Norden. Eine Fahrstraße (Kalkofenweg) sowie mehrere Fußwege (z.B. Treppenweg) führen von der Hangkante in das Tal hinunter.



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

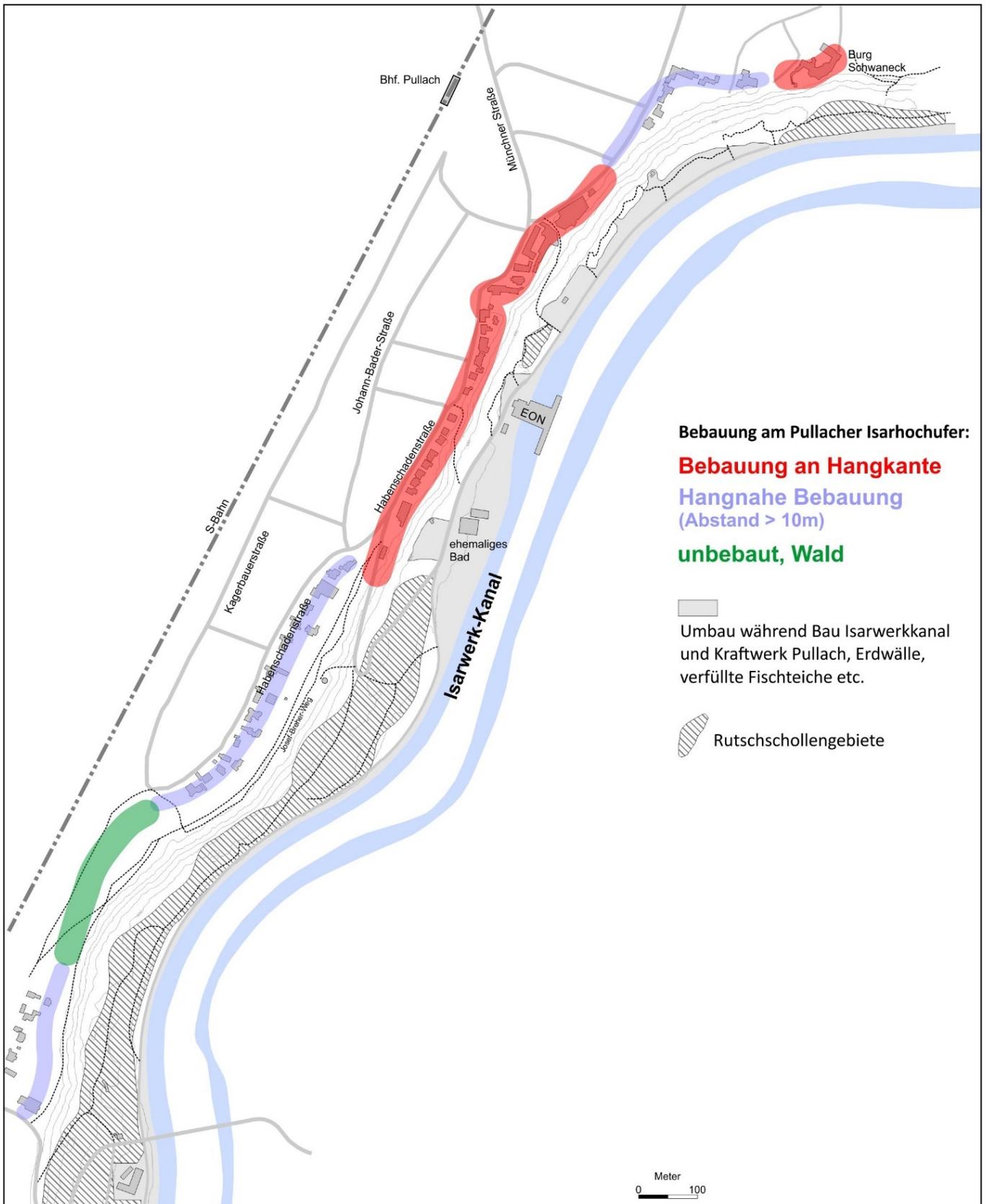


Abb. 27: Vereinfachte Charakterisierung der Bebauungs- und Nutzungssituation im Bereich des Pullacher Isarhochufers.

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 der zugehörige 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.

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, 1894 das Wasserkraftwerk Höllriegelskreuth und 1900 das Wasserkraftwerk Pullach. Zum Betreiben dieser Kraftwerke wurde bei Buchenhain ein Teil des Wassers der Isar in den 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 (Dämme 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 28].

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 25].

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 24] [U 25] [U 27]) dargestellt.

5.7 Bodenkennwerte - Parameterstudie

Die boden- und felsmechanische Charakterisierung der im Isarhang auftretenden Locker- und Festgesteine ist trotz umfangreicher Untersuchungen und Literaturdaten schwierig, da die Angaben große Streuungen aufweisen. Dies hängt damit zusammen, dass die Schichten schwankende Grade an Verfestigung und Konsolidierung aufweisen (siehe Tab. 17) und manche Autoren Festgesteinscharakter ansetzen, andere dagegen noch von Lockergesteinen ausgehen.

Im Folgenden werden exemplarisch wichtige Quellen angeführt. Erkenntnisse daraus finden auch Eingang in die von uns empfohlenen Kennwertspannen der geologisch-geotechnischen Schichten (siehe Kap. 5.2). Tab. 17 zeigt eine Zusammenstellung aus der Masterarbeit von D. Davies [U 31], während Tab. 18 eine Vergleichsstudie aus dem Jahr 2016 zeigt [U 16].

Aus der Gesamtheit dieser Rechercheergebnisse und den Feld- und Laboruntersuchungen dieser Arbeit wurde schließlich ein orientierender Kennwertsatz aufgestellt (Tab. 19). Dieser charakterisiert die auf dem Kartenblatt ausgewiesenen Schichten und differenziert zwischen „günstigen“ (Kennwertsatz A) und „ungünstigen“ (Kennwertsatz B) Parametern, die sich zum Beispiel durch fortschreitende Verwitterung, Aufweichung bei Starkregen etc. ergeben können. Diese Werte können in Zukunft als Orientierungswerte für statische Entwürfe, Böschungsbruchberechnungen und dergleichen herangezogen werden.

Tab. 17: Zusammenstellung der in Gutachten verwendeten Kennwerte. Die unterschiedlichen Bezeichnungen der Schichten wurden hier soweit möglich vereinheitlicht (siehe [U 31]).

	Reibungswinkel φ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]	Wichte γ/γ' [kN/m ³]
Baumann (1988) Dissertation [U 23]			
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 51]			
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 53] (Werte Hangschutt und Tertiär aus Scherversuch)			
Hangschutt	22	50	-/18
Terrassenschotter	40	0	-/21
Flinz	22	50	-/22
LfU (2004) Habenschadenstr. 13 [U 44]			
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 59]			
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

Tab. 18: Vergleich von Bodenkennwertsätzen verschiedener Bearbeitungen mit ungefährender Schichtkorrelation. Es werden jeweils Reibungswinkel φ' [°], Kohäsion c' [kN/m²] und Wichte γ [kN/m³] angegeben (aus [U 16]).

Boden / Fels	Gutachten Zentrum Geotechnik [U 59] Habenschadenstraße 7	Gutachten Floss (1993) [U 51] Bürgerbräu - Neubau	Gutachten LfU [U 44] Habenschadenstraße 13	Diverse Gutachten BBB z.B. Habenschadenstraße 23-25	BBB 2015 [U 15]	
					Kennwertsatz A (normale, aktuelle Hangsituation) Habenschadenstraße 7	Kennwertsatz B (Verschlechterung durch Rodung, Erosion, Sturm etc.) Habenschadenstraße 7
Schicht „Auffüllung“	27,5 / 0 / 19	-	-	-	27,5 / 0 / 19	
Schicht „Obere Schotter“	38 / 5 / 22	38,5 / 10 / 22	35 / 8 / 21	25 / 3 / 18	35 / 8 / 21	35 / 5 / 21
Schicht „Kiese, teilw. zu Nagelfluh verfestigt“			40 / 20 / 23	45 / 30 / 21	40 / 20 / 23	38,5 / 15 / 22
Schicht „Nagelfluh“			38 / 15 / 24		38,5 / 40 / 22	40 / 20 / 23
Schicht „Untere Schotter“	38 / 8 / 23	38,5 / 15 / 22	38,5 / 15 / 22	(35 / 10 / 19)	38,5 / 15 / 23	
Schicht „Flinz“	27,5 / 20 / 20	27,5 / 20 / 19	18,5 / 0 / 22	35 / 20 / 22	27,5 / 20 / 20	

Tab. 19: Orientierende charakteristische Boden- und Felskennwertsätze des „Geo-Atlas Hangbewegungen“, differenziert in aktuelle (A) und sich potentiell ungünstig entwickelnder Kennwerte (B) (aus [U 16]).

Boden / Fels	Kennwertsatz A (normale, derzeitige Hangsituation)	Kennwertsatz B (Verschlechterung durch Rodung, Erosion, Sturm etc.)
Schicht Auffüllungen	30 / 3 / 19	
Schicht Hangschutt / Schuttfuß	30 / 8 / 20	
Schicht „Obere Schotter“, Terrassenschotter und / oder „Kiese, teilweise verbacken oder zu Nagelfluh verfestigt“	38,5 / 10 / 21	35 / 8 / 21
Schicht „Nagelfluh“	45 / 100 / 23	40 / 40 / 23
Schicht „Untere Schotter“, Deckenschotter	38,5 / 15 / 23	
Schicht „Flinz“	27,5 / 20 / 20	

Kommentare zu den Fels- und Bodenkennwerten

Bei Betrachtung der Lockergesteine (Kiese und Schotter) kann aufgrund der meist weitgestuften Körnung, der Lagerungszeit und vergleichsweise hohen Lagerungsdichte sowie auch verschiedenen Graden der Verbackung eine deutliche Kohäsion der grobkörnigen Böden angenommen werden („Verhakungskohäsion“, Kohäsion durch bindigen Anteil in der Matrix, Kohäsion durch Zementation). Dies wird von allen Bearbeitern sehr ähnlich gesehen wie obige Tabellen belegen.

In den „Terrassenschottern“ wurde in Tab. 19 aufgrund der heterogenen Verbackung (siehe z.B. Schichtverzeichnisse Bohrung NMB-1) ein Mischwert gebildet aus reinem Lockergesteinskennwert und Eigenschaften schwachen Felses.

Für die Festgesteinsschicht Nagelfluh sind die Kennwerte ebenfalls sehr vorsichtig für „schwachen“ Fels gewählt. Baumann [U 44] beispielsweise weist Reibungswinkel $\phi' = 40^\circ$, Kohäsion $c' = 20 \text{ kN/m}^2$ aus, Floss [U 51] Kohäsionen $c' = 40 \text{ kN/m}^2$, was insgesamt ebenso als sehr vorsichtig gelten muss. Tatsächlich können in der Nagelfluhlage und den darüber liegenden konglomerierten Bereichen Kohäsionen $c' > 100\text{-}500 \text{ kN/m}^2$ angenommen werden. Baumann [U 23] zum Beispiel nimmt Spannweiten von $c' = 200\text{-}1000 \text{ kN/m}^2$ an.

Dies verdeutlicht die Spanne möglicher Kennwerte. Als charakteristischen Wert gehen wir daher im gegenständlichen Bericht von Kohäsionen $c' = 40 / 100 \text{ kN/m}^2$ aus (Kennwerte B und A).

Die beiden Kennwertsätze (A und B) sind das Ergebnis unserer Einschätzungen und des Literaturvergleichs. **Kennwertsatz A** repräsentiert dabei den aktuellen Zustand des Hangs („Normalzustand“). Zum Vergleich haben wir in **Kennwertsatz B** die Werte ermittelt, die den Einfluss ungünstiger Maßnahmen oder Prozesse auf das Hanggleichgewicht verdeutlichen (z.B. künstliche Eingriffe wie Rodung und somit Entfernung des natürlichen Erosionsschutzes, Einleitung von Wasser etc...).

Kommentare zu den mechanischen Eigenschaften der Klüfte in der Nagelfluh

Klüftung und Durchtrennung der Nagelfluh bestimmen wesentlich die felsmechanischen Eigenschaften der gesamten geotechnischen Schicht. Diese können Teil eines Versagensprozesses wie 1962 an der Burg Schwaneck sein.

Erfahrungsgemäß kann für Konglomerate von **Kluftreibungswinkeln von $\phi' = 35^\circ$** ausgegangen werden. Da eine komplette Durchtrennung der Klüfte entlang des gesamten Nagelfluhpakets unwahrscheinlich ist wie auch unsere Aufnahmen vor Ort zeigen, besteht aufgrund von Materialbrücken und / oder geringen Kluftreichweiten eine **Rest-Kohäsion von $c' = 10 \text{ kN/m}^2$** .

Kommentare zu den mechanischen Eigenschaften des Flinz

Die Bodenmechanik der überkonsolidierten neogenen Sedimente ist ausführlich bei Baumann 1988 [U 23] besprochen.

5.8 Kritische Hanghöhe nach Baumann

Der Begriff der „kritischen Hanghöhe“ wurde von Baumann (1988) erstmals erwähnt und als ein „Maß für einen gerade noch stabilen Hang [...] mit vorgelagerten Rutschmassen aus früheren Bruchvorgängen“ definiert [U 23]. 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. Maßgebliche Größen sind die Festigkeit, Trennflächencharakteristik und Lage von verfestigten Zwischenlagen im Flinz sowie die Verteilung und Ausbildung von Schwächezonen in der Nagelfluh.

Auf Grundlage der von Baumann ermittelten kritischen Hanghöhe wurden die westlichen Isarhänge im Bereich von Pullach mit diesem Kriterium bewertet (Abb. 28). In den rot markierten Bereichen ist die kritische Hanghöhe möglicherweise definitionsgemäß erreicht, blau markierte Bereiche dagegen erreichen zwar ebenfalls über 40 m Hanghöhe, allerdings nicht im kritischen Bereich zwischen Hangkante und basalem Nackentälchen. Weite Strecken der roten Bereiche im nördlichen Teil der dargestellten Karte jedoch liegen in einer Zone, deren Hangfuß durch den Bau des Isarwerkkanaals stark überprägt ist. Hier liegen künstliche Erdwälle vor, die heute als Stützung des Hangfuß fungieren. Über das ehemalige möglich Vorhandensein von großen Paläo-Rutschkörpern und der Position früherer Nackentälchen kann nur spekuliert werden.

Kommentar: Die Ergebnisse weisen lediglich Zonen aus, in denen die Disposition für Großrutschungen gemäß dem Berechnungskriterium nach Baumann gegeben ist. Diese sind jedoch nicht mit Gefahrenzonen oder Risikozonen gleichzusetzen.

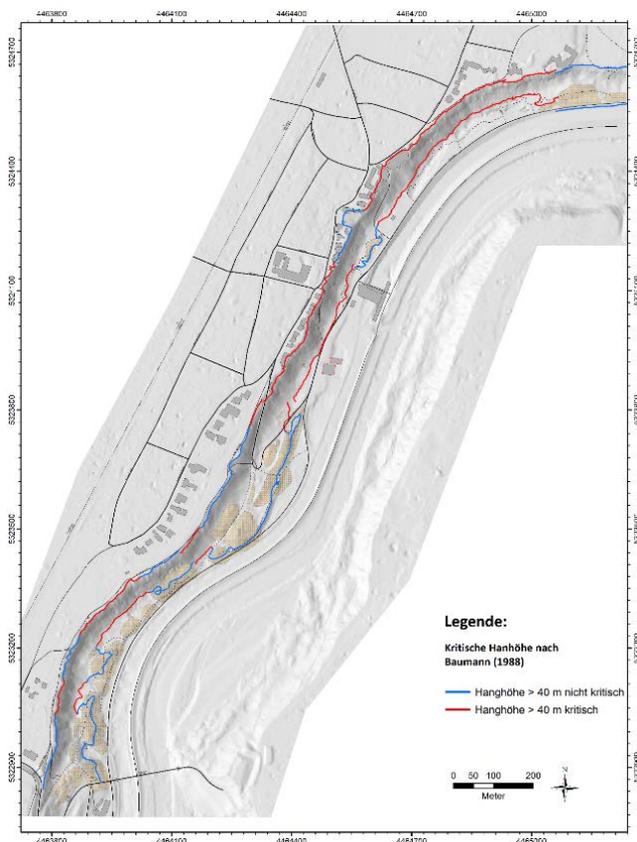


Abb. 28: Darstellung der kritischen Hanghöhe im Projektgebiet (nach Baumann, 1988 [U 23]). Die roten Zonen im nördlichen Blattbereich sind jedoch spekulativ, da mögliche alte Nackentälchen und Rutschkörper hier durch Erdbewegungen des frühen 20. Jahrhunderts nicht mehr definierbar sind. (unmaßstäblich)

5.9 Hangbewegungsmonitoring

Seit den 1970er Jahren werden Vermessungen an beiden Hochufern der Isar in Pullach und Grünwald durchgeführt, um Rutschkörper zu überwachen oder andere Deformationen zu erkennen. Dabei kamen und kommen verschiedenen Systeme zum Einsatz:

- Geodätische Vermessungsnetze
- Bohrlochinstallationen (Stangenextensometer, Inklinometer, Gleitmikrometer, Trivec)
- Kluft- und Mauerspione
- Konvergenzmesstrecken

Die ersten Bohrlochmessstellen wurden an den Rutschungen der Grünwalder Hangflanke von 1970 und 1975 und im Bereich der alten Grünwalder Brücke installiert.

Tab. 20: Geotechnisch instrumentierte Bohrungen am westlichen Isarufer zwischen Grünwalder Brücke und Burg Schwaneck.

Bereich	Bohrung / Bez.	Ausstattung / Messzeitraum	Auftraggeber / Betreiber / Eigentümer:	Messung: GRÜN: aktuell ROT: keine aktuelle Messung Durchführung durch:
Burg Schwaneck	HB-1	Drahtextensometer	Landratsamt München	Messung durch LRA München
	SB-4	Stangen- und Drahtextensometer seit 1989		Messung durch LfU (3 pro a)
Bürgerhaus	NMB 1	Inklinometer seit 1989 bis 1998	Gemeinde Pullach	Zentrum Geotechnik
	GMB 2	Gleitmikrometer und 3 Drahtextensometer seit 1989		Zentrum Geotechnik
	TVB 3	Trivec-Messsonde seit 1989 bis 1998		Messung durch LfU (3 pro a)
Habenschadenstraße 33-	B1-Nord	Stangenextensometer 1992 – 2013	Unklar, FI-Stück 56/12 ehemals EON	Messung durch LfU eingestellt
	B2a	Stangenextensometer seit 1992	Unklar, FI-Stück 56/28	Messung durch LfU (3 pro a)
Grünwalder Brücke	B 1 *	Inklinometer - seit 1994 - seit 2015 (neue Nullmessung)	Staatliches Bauamt Freising	Messung durch LfU (3 pro a)
	B 3/3 *	Inklinometer - seit 2009		Messung durch LfU (3 pro a)
	B 9	Stangenext. – seit 1994		Messung durch LfU (3 pro a)
	B 3/1	Stangenext. – seit 1999		Messung durch LfU (3 pro a)

B1 : Messstellen in weiterer Betreuung durch LfU / **B1** : Zukünftig in Betreuung durch BBB

*Bauwerksbezogene Messstellen der Grünwalder Brücke

Auf Pullacher Seite wurden im Bereich der Burg Schwaneck, beim Bürgerhaus sowie unterhalb des Becker-Anwesens (Habenschadenstraße 33-35) Messstellen errichtet, des Weiteren auch im Rutschbereich an der Grünwalder Brücke (Abb. 29).

Die messtechnisch instrumentierten Vertikal- und Schrägbohrungen, die zur Erkennung großräumiger Hangbewegungen und Rutschungen bis in die Flinzbasis eingreifen, sind mit zugehöriger Ausstattung in Tab. 20 recherchiert und zusammengefasst. Die Messungen in den Bohrungen wurden zum Teil nach wenigen Jahrzehnten aufgrund geringer Deformationen eingestellt, so geschehen unterhalb der Habenschadenstraße 35 [U 44].

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

Tab. 21: Bestehende geodätische Messprofile.

Messprofil	Lokalität	Auftraggeber / Betreiber / Eigentümer:	Messung durch:
Messprofil 5	Ca. 100 m nördlich Grünwalder Brücke	Staatl. Bauamt Freising	LfU – Messung nur nach Bedarf, zuletzt 2012
Messprofil 2	Ca. 200 m südlich Grünwalder Brücke	Staatl. Bauamt Freising	LfU – Messung nur nach Bedarf / Starkregen
Messprofil 1	Ca. 400 m südlich Grünwalder Brücke	Staatl. Bauamt Freising	LfU – Messungen wegen starker Vegetation eingestellt im Jahr 2006 Zusätzlich 4 Bohrungen mit Drahttextensometern

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. 22 und Tab. 23.

Tab. 22: Konvergenzmessstrecken, installiert durch BBB im Jahr 2014.

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

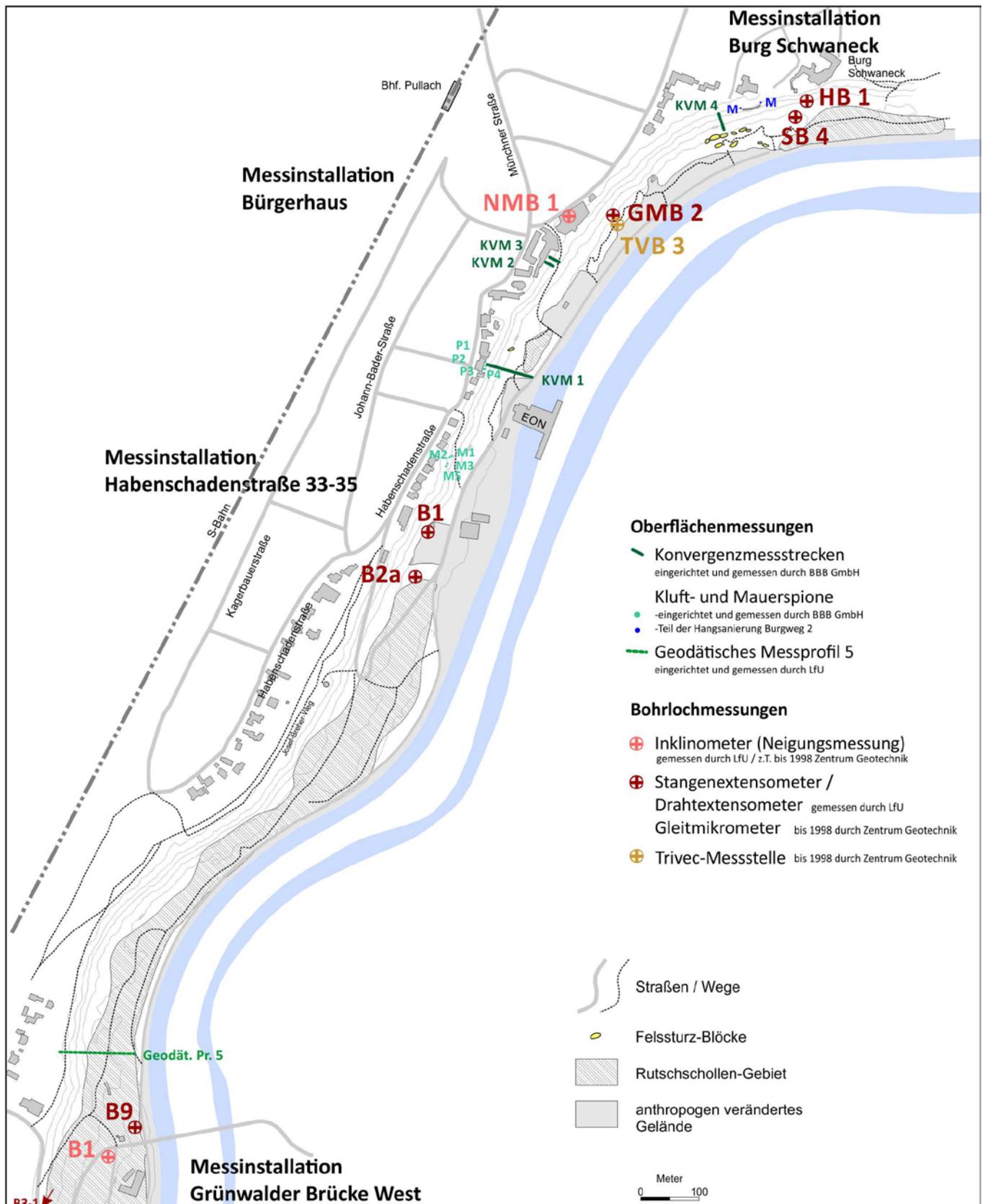


Abb. 29: Zusammenfassung der Monitoring-Einrichtungen am Pullacher Isarhochufer. Weitere geodätische Vermessungsnetze können vorhanden sein, werden aber nicht gemessen bzw. sind eventuell auch nicht mehr zugänglich.

Tab. 23: Kluft- und Mauerspione, mit Ausnahme Burgweg 2 installiert durch BBB in den Jahren 2005 [U 9] und 2013 [U 11].

Kluft- und Mauerspione	Anzahl der lokalen Messpunkte
Burgweg 2	2 Messpunkte an steiler Nagelfuhwand (Betreuer unbekannt)
Habenschadenstraße 15/17	4 Messpunkte an Gartenmauern (P1 - P4) (seit 2013)
Treppenweg (Habenschadenstraße 25/27)	4 Messpunkte in Konglomeraten (M1 - M5) (seit 2005)

Kommentar: Es besteht ein vergleichsweise dichtes Messstellennetz am Isarhang im Raum der Gemeinde Pullach. Dieses muss in Zukunft regelmäßig bedient werden im Rahmen der geotechnischen Überwachung und des behördlichen Risikomanagements. Eine Auswertung der bis zum Zeitpunkt der Berichterstellung zu Verfügung stehenden Daten liefert Kap. 6.3. In Kap. 8.1 wird ein geotechnisches Monitoringprogramm vorgeschlagen.

6 Ingenieurgeologische Gefährdungsanalyse

6.1 Klassifizierung der Hangbewegungen am Pullacher Isarhang

Im Folgenden 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 in Gefährdungsbildern durchgeführt, die i.Pr. auch eine prozessunabhängige 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 Abb. 30 schematisch dargestellt. In diesem Kapitel werden zunächst **Rutschprozesse** (B und D) näher beschrieben und anschließend **Sturzprozesse** (A und C) erläutert.

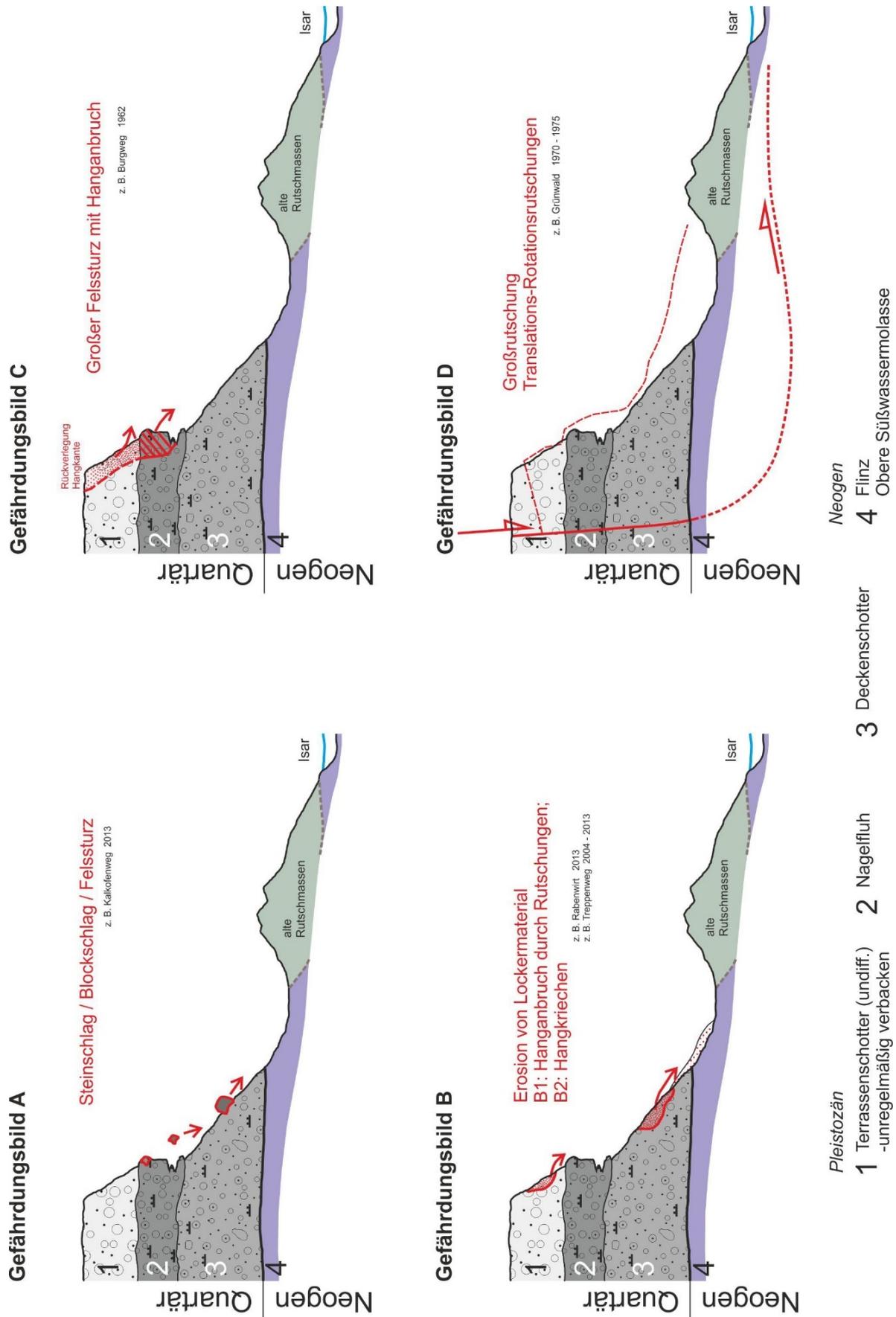


Abb. 30: Schema zur Mechanik und Dimension der prinzipiellen Gefährdungsbilder A bis D am Pullacher Isarhang.

6.1.1 Lockergesteinsrutschung / Hanganbruch

Lockergesteinsrutschungen/Hanganbrüche (Gefährdungsbild B) sind flachgründige Rutschungen innerhalb der Lockergesteins- und Verwitterungsdecke mit Abbruchkanten $< 1\text{ m}$ (kleiner Hanganbruch) und $> 1\text{ m}$ (großer Hanganbruch). Sie treten meist plötzlich im Zusammenhang mit Starkregenereignissen auf, wenn durch den erhöhten Wasserzutritt die Scherwiderstände des Bodens reduziert werden. Vor dem Versagen kann es bereits zu Kriechbewegungen kommen, die durch hangparallele Risse im Boden 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 m^3 bis über 700 m^3 identifiziert. Die Bezeichnung „Hanganbruch“ richtet sich nach LfU-Empfehlungen [U 38]. Die Höhe der Abbruchkante beschreibt den vertikalen Abstand zwischen der Rutschungskrone und dem höchsten Punkt der planaren Gleitfläche.

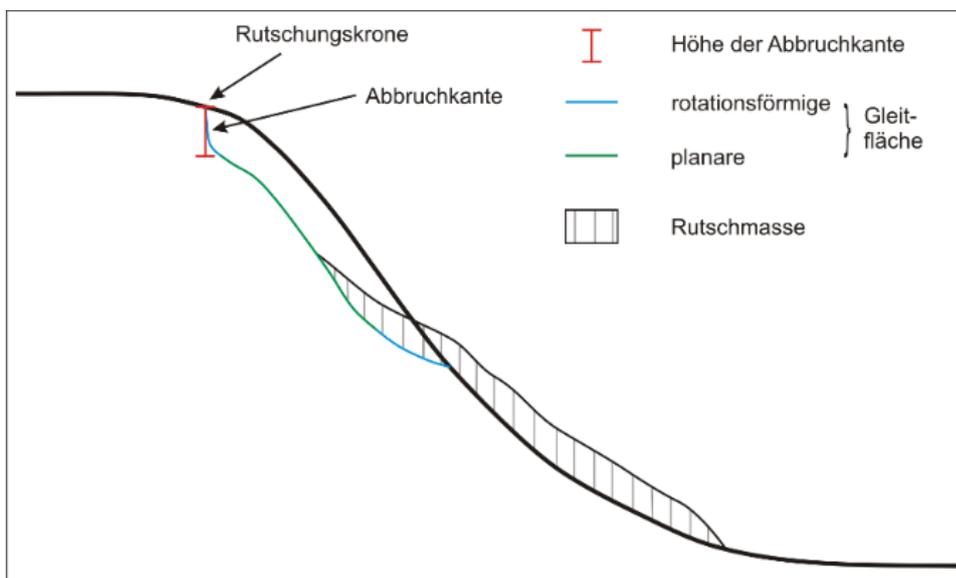


Abb. 31 Schematisches Profil einer Lockergesteinsrutschung mit Rutschungskrone, Abbruchkante und Gleitfläche.



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 (Gefährdungsbild D) werden durch das Abgleiten großer Hangbereiche, bestehend aus der gesamten lithologischen Schichtfolge (glaziale Schotter, Konglomerate und neogener Flinz) entlang kombinierter planarer (Translationsrutschung) und kreisförmiger Gleitflächen (Rotationsrutschung) definiert. Anhand fossiler Rutschschollen 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. 24 dargestellt.

Initialisierung und Verlauf von Großrutschungen hängen von zahlreichen Faktoren ab, wie den Scherwiderständen in tertiären Schichten (Flinz), der Hanghöhe und Morphologie, dem Zustand der Nagelfluh und anderem. Die Untersuchung, Kinematik und Modellierung der Pullacher und Grünwalder Großrutschungen ist im Detail von Baumann und anderen beschrieben (z.B. [U 23] [U 24] [U 25] [U 26] [U 27]), worauf hier verwiesen werden soll. Abb. 33 zeigt und erläutert ein stark vereinfachtes Ablaufschema.

Bei der sehr gut dokumentierten Großrutschung in Grünwald 1970 (Tab. 16) 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 30]. 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, in Nagelfluhbänken jedoch i.d.R. an steilen Klüften orientiert, bevor sie sich innerhalb des Tertiärs möglicherweise zu planaren Scherbahnen entwickeln (kombinierte Rotations-Translationsrutschungen). Während der Rutschung bildet sich talseitig der Konglomeratscholle eine Melange aus Schottern, aufgearbeitetem Flinz und gelösten Konglomeratblöcken, die von den kompakten Konglomeratschollen Richtung Isar geschoben wird. Das gesamte abrutschende Paket kann am Hangfuß liegende alte Rutschschollen weiter talwärts schieben bzw. reaktivieren und somit einen noch größeren Bereich beeinflussen. Auch ist es möglich, dass durch das fehlende seitliche Widerlager im Bereich anstehender Konglomeratwände weitere sekundäre Abbrüche initialisiert werden. Weitere Informationen zu Großrutschungen werden in Kapitel 4 und 5.5 gegeben.

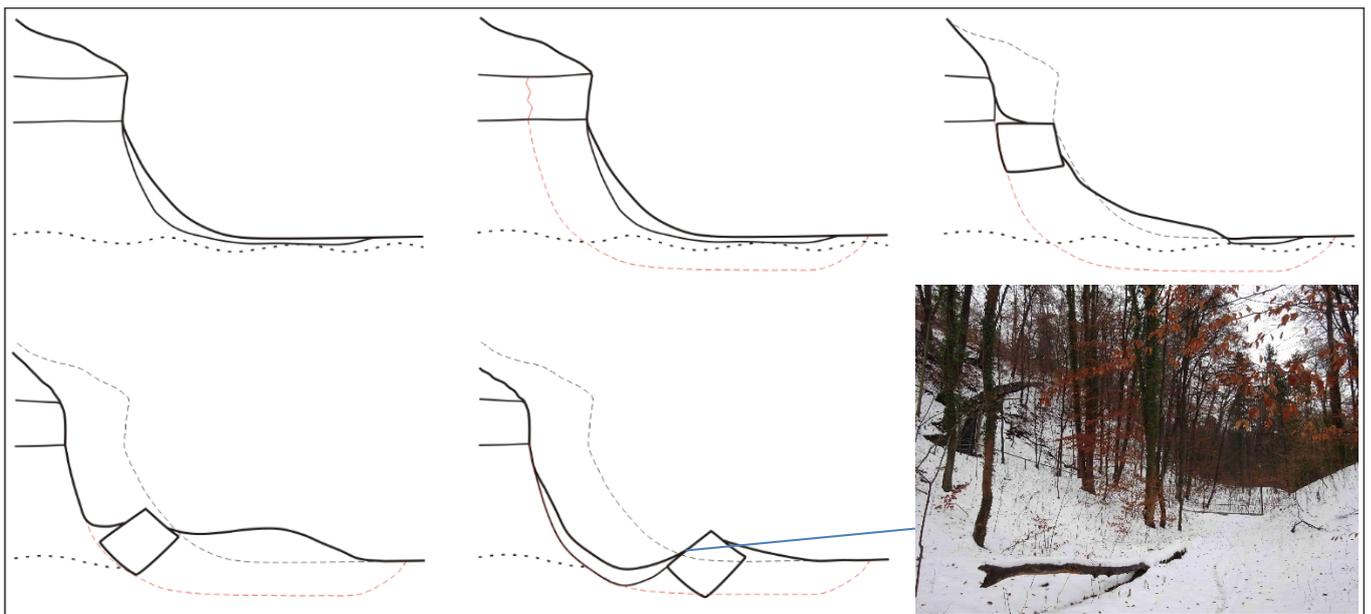


Abb. 33: Entwicklungsschema einer kombinierten Rotations-Translationsrutschung mit den Phasen (von links oben nach rechts unten): Grenzgleichgewicht (1), Ausbildung von Zerrspalten im Konglomerat (2), vertikale Setzungen und Verdrängen der unterlagernden Schichten (3), Übergang in ein planares Gleiten (4), reliktsche Rutschscholle mit erodierter talseitiger Melange (5). Rechts unten: Blick in das Nackentälchen am „Brückenweg“ mit deutlich erkennbaren verkippten Rutschschollen im Jahr 2017.



Abb. 34: Abrisskante in Terrassenschottern und Rutschungskopf mit betrunkenem Wald bei Grünwald. Das Bild zeigt die in obiger Abbildung (Bild 3) skizzierte Phase. – Foto: H.J. Baumann [U 30].

Tab. 24: Zusammenfassung der markanten Großrutschungskörper 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 m ³ 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
8	296/-	1 */**	Sehr steile talseitige Flanke, hangseitiger Bereich sehr flach/durch Forstweg überprägt, evtl. Staffelbruch von Rutschscholle Nr. 7, Alter > 2800 Jahre

Nr. des Rutschk.	Streichen/Fallen (nach Clar)	Alternative Nummerierung	Beschreibung
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 (betrunken Wald), kleiner ca. 4 m ² 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 (Gefährdungsbild A) 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 Bäumen die dynamische Belastung in den Boden abgeleitet wird [U 40]. Anzeichen für eine lokale Steinschlaggefährdung können nur bei einer detaillierten Untersuchung der Konglomeratwände 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 Klassifikationen (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 (Gefährdungsbild A) werden durch den Abbruch von Konglomeratblöcken mit Größen zwischen 30 cm Durchmesser bis 5 m^3 (kleiner Blocksturz) und 5 bis 10 m^3 (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 (siehe folgende Abbildung).



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 40] 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 40] ein Volumen bis 0,1 m³ eine Masse von bis über 200 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 zwei 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“ (Gefährdungsbild A) steht in dieser Arbeit für den Abbruch eines großen Konglomeratbereichs (10 bis 100 m³), der sich zunächst stürzend oder kippend von der Felswand löst und sich rollend bis gleitend Richtung Hangfuß bewegt. Das Lösen von der Wand geschieht entlang von Trennflächen (Klüften), die sich durch das Zusammenspiel von Verwitterung und Spannungsumlagerungen gebildet und geöffnet haben. Anzeichen eines Felssturzes sind hangparallele, teilweise bereits weit geöffnete Klüfte und Risse an der Hangkante oder vertikale Klüfte an exponierten Wandbereichen (siehe 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. 16). Der exakte Zeitpunkt eines Felssturzes ist nicht prognostizierbar, da neben weiteren Faktoren die rückhaltenden Kräfte nur näherungsweise 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 Disintegration (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 [U 41] 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 (Gefährdungsbild C).



Abb. 36: Potentieller Felssturzblock ca. 80 m südöstlich der Burg Schwaneck (Gefährdungsbild A). 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).



Abb. 37: Großer Felssturz von 1962 unterhalb der Burg Schwaneck (Gefährdungsbild D). Links: Östliche Abbruchkante der Nagelfluh, Sicherung mit Ankern und Spritzbeton (rechter Bildrand). Im darüber liegenden bewaldeten Hang kam es zu einem Hanganbruch bis zur oberen Kante, der in Abb. 10 sichtbar ist. Rechts: Grobe Felssturzschnellen am Hangfuß.

6.2 Analyse der Aktivität der Hangbewegungen

Im Rahmen von Gefährdungsanalysen sind probabilistische Angaben zu treffen. Neben der potentiellen Intensität eines potentiellen Ereignisses ist es entscheidend zu wissen, wie wahrscheinlich das Eintreten ist. Detaillierte Ausführungen dazu werden zum Beispiel in [U 42] und [U 43] 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. Starkregenwahrscheinlichkeit etc.) gesammelt und gewichtet werden, um Wahrscheinlichkeiten zu definieren. Diese Betrachtungen werden in Kap. 6.6.3 aus den Kartiererergebnissen 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. 38, Kap. 5.5). Eine Analyse dieser Ereignisse lässt auf Wiederkehrdauer bzw. Frequenzen der unterschiedlichen Massenbewegungen schließen.

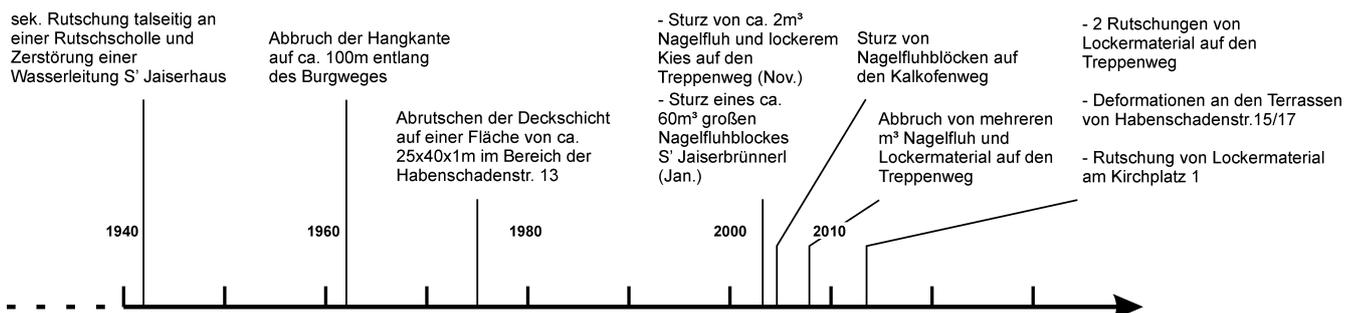


Abb. 38: Zeitstrahl der Massenbewegungen im Bereich der Gemeinde Pullach ab 1940. Da sie vermutlich als nicht relevant eingestuft wurden, finden sich in der Literatur keine Lockergesteinsrutschungen / Hanganbrüche vor 2003.

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 große Klüfte mit hoher

Durchtrennung entwickeln. Dieser Prozess kann mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte andauern, was sich in nur zwei 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.34 dokumentierten anbruchgefährdeten Nagelfluhaufschlüssen, so ist für Felsstürze von einer Wiederkehrdauer von Jahrzenten auszugehen.

Aufgrund der zeitlichen Dimension 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:

Absolute und relative Altersdatierungen: 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.

Zustand der Bebauung: Deutlich jüngere Hinweise auf Aktivität/Inaktivität 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 (Abb. 39).

Ergebnisse aus dem Monitoring: Im Bereich des Hangfußes, unterhalb der hangnahen Bebauung, wurden vom LfU in den 1970er Jahren mehrere Probebohrungen mit Extensometermessgeräten ausgestattet (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.

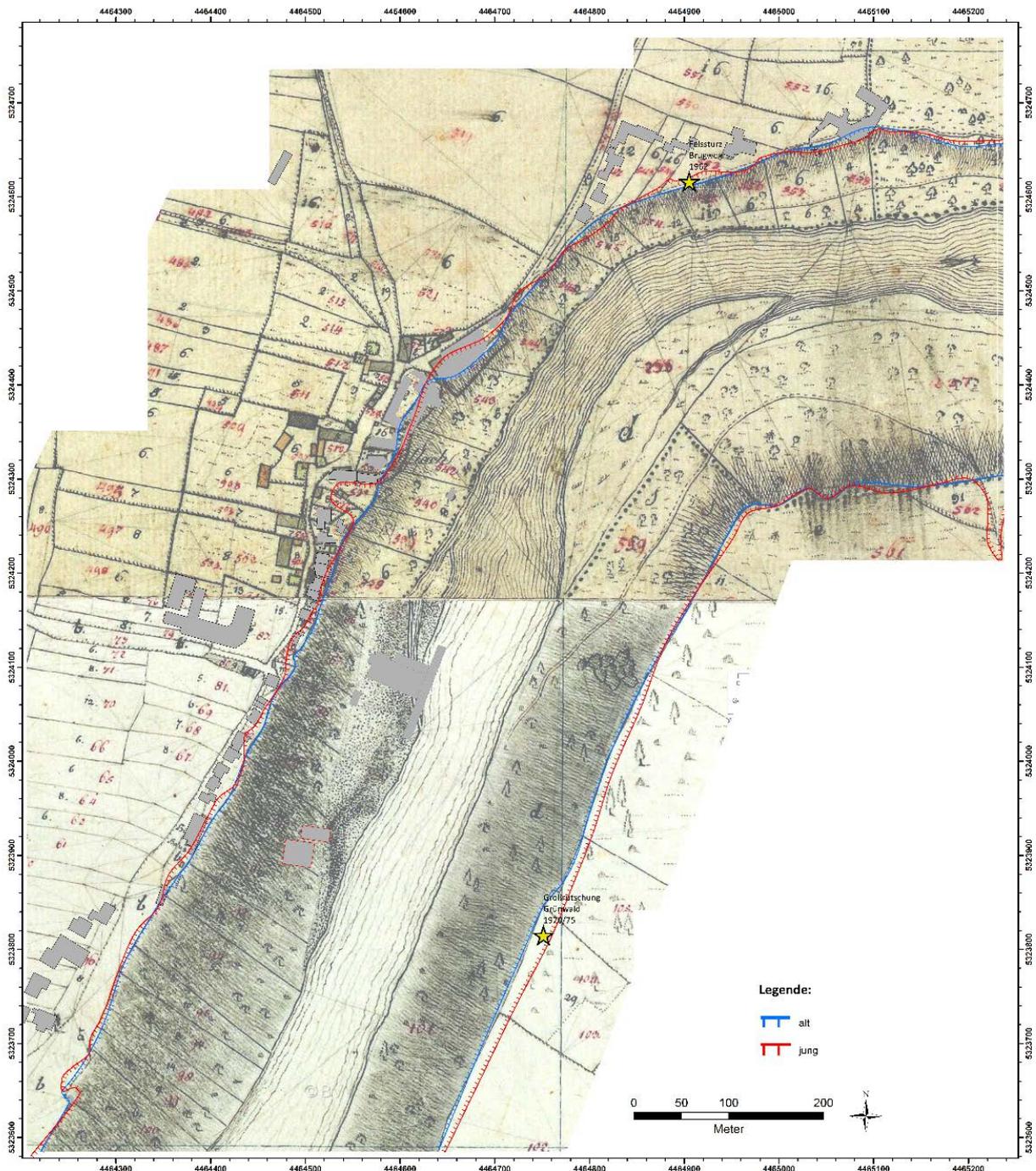


Abb. 39: Vergleich der Hangkante heute – 1841 (Quelle: heute: dgm2 des Landesamtes für Vermessung), 1841 (Bayernatlas, historische Karte 1817-1841).

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 bis monatlich).

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

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. 25: 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 Wirkungsräume und Aktivität

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

Lockergesteinsrutschungen/Hanganbrüche (B) 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 theoretisch von der Hangkante bis zum -fuß eine Länge von über 60 m erreichen (Entfernung Abrisskante bis maximale Reichweite).

Alte **Rotations-Translationsrutschungen (D)** finden sich im gesamten südlichen Projektgebiet, ausgenommen Ortskern Pullach, sowie ganz im Norden, girlandenartig mit einem Abstand von ca. 20 m entlang des Hangfußes aufgereiht. Keine Rutschschollen 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 (A) 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** (A) 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 nur bedingt möglich.

Große Felsstürze mit Hanganbruch (C) liegen lediglich in einem Fall vor (Burg Schwaneck 1962).

6.3 Deformationsmessungen

6.3.1 Ergebnisse des Monitoring in Borlochmessstellen

Die Aufgabenstellung umfasste eine Aufnahme des Messstellenbestands und Recherche der Betreiber sowie Messdaten zur Planung eines künftigen Monitorings. Die Details des Bestands sind in Kap. 5.9 dargelegt. Die Verhandlungen mit Betreibern und Eigentümer sind im Gange. Bezüglich einiger Messstellen liegen bereits Vereinbarungen vor, die eine Weiterleitung von Messdaten durch das LfU an das BBB ermöglichen:

- GMB2 unterhalb des Bürgerhauses Pullach
- B1, B9, B3/1, B3/3 an der Isarbrücke Grünwald (hier liegt dem LfU die Erteilung der Nutzungsrechte zur Weitergabe durch den Auftraggeber StBA Freising vor)

Zur Auswertung und Interpretation der Deformationsmessungen, die entweder nicht von BBB selbst durchgeführt wurden, oder für die noch keine Vereinbarung zur Datenweitergabe vorliegt, kann an dieser Stelle nur eine grobe Zusammenfassung gegeben werden. Eine vollständige Erhebung sowie Neuaufnahme von Messungen unter Betreuung durch BBB ist vorgesehen.

Burg Schwaneck: Es liegt noch keine Vereinbarung zur Weitergabe der Messergebnisse durch das LfU vor. Aus unserer Einsichtnahme stellt sich die Situation wie folgt dar. 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). 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).

Es treten also nur sehr geringe Deformationen auf.

Am Bürgerhaus: Die Messstellen sind im Eigentum der Gemeinde Pullach. Gemessen wurde durch das Zentrum Geotechnik, allerdings erfolgen mit Ausnahme der Drahtextensometer in GMB 2 keine aktuellen Messungen. Zusammenfassend zeigt sich, dass die im Bürgerhaus und am Hangfuß eingebauten Messeinrichtungen bis 1998 / 1999 ebenfalls nur geringe oberflächennahe Bewegungen anzeigen [U 24] [U 52]. Dasselbe gilt für die Drahtextensometer, für die uns Messergebnisse bis 2017 vorliegen.

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 Osten, parallel zum Isarhang nach Norden 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 am Stangenextensometer B1 wurden 2013 nach 18 Jahren von Seiten des LfU eingestellt [U 45]. Die bis dahin gemessenen Verformungen waren sehr gering. Bohrung B2a wird weiter gemessen.

In der nördlichen Bohrung wurden bisher lediglich 1,2 mm Stauchung entlang der Bohrachse festgestellt, die sich ab 2002 fast ausschließlich in dem Bereich zwischen 10 m und 30 m ereignete. Die Stangenextensometer in der S' Bohrung zeichneten nur im Bereich zwischen 17 m 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 24]. 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) schon seit vielen Jahren und aktuell 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 nördlich davon bis zum Kalkofenweg haben.

Anzumerken ist, dass im Zuge der Rutschung steile Nackentälchen entstanden, in denen es sekundär zu Nachsackungen und Kriechbewegungen kommen kann. Dies bereitet beispielsweise Probleme für den unteren Kalkofenweg. Hier müssen regelmäßig Straßenausbesserungen vorgenommen werden.

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

6.3.2 Ergebnisse der Konvergenzmessungen

An den insgesamt vier installierten Messlinien wurden über 3 Jahre (Habenschadenstraße 15) bzw. gut 2 Jahre (Rabenwirt, Burgweg) die Bewegungen in den obersten Bodenschichten gemessen. Die letzte Messrunde fand im Sommer 2016 statt. Überwiegend ergaben alle Messungen Bewegungsraten von ≤ 1 mm/Monat, mit einem Maximalwert von 2,3 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 absolute Dehnung zum Ursprungswert von 13,0 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 8,8 mm (KVM 4/2) und um 5,2 mm (KVM 4/3). Insgesamt verkürzte sich die ursprüngliche Strecke somit um ca. 1 mm.

Tab. 26: 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	+ 13,0 mm	0,6 mm/Monat	8,7932 m
KVM 4/2	- 8,8 mm	0,5 mm/Monat	15,6119 m
KVM 4/3	- 5,2 mm	0,2 mm/Monat	8,0763 m
KVM 4		-	Σ 32,4814 m

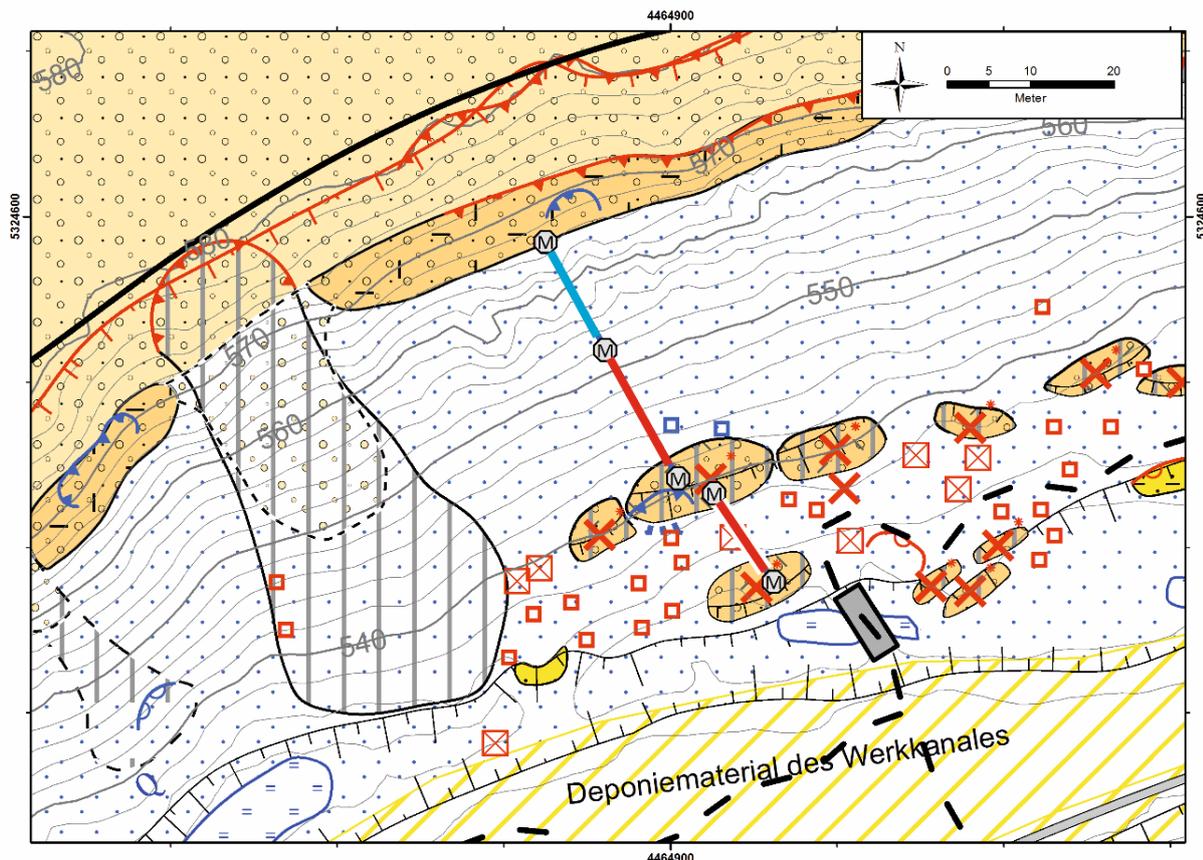


Abb. 40: Die Konvergenzmessstrecken Burgweg (KVM 4), vergrößert aus der Geologischen Karte mit absoluten Abstandsmessungen. Rot = Verkürzung, blau = Verlängerung der Messstrecke. (Stand: 08/2016)

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 KVM 2 innerhalb der Rutschung zeigt im Messabschnitt 1 (KVM 2/1) eine Verkürzung von -23,7 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 von insgesamt 44,5 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 20,8 mm verlängert.

Die Messstrecke KVM 3, nördlich anschließend, zeigt in Messabschnitt 1 eine Verlängerung von 10,1 mm (max. Bewegungsrate 4,2 mm/Monat). Der Messabschnitt 2 (KVM 3/2) hat sich innerhalb des Messzeitraums um 17,5 mm verkürzt, der Messabschnitt 3 (KVM 3/3) hat sich um 6,1 mm verlängert. Somit ergab sich eine Verlängerung der KVM 3 um 1,3 mm. Alle erwähnten Messwerte der beiden Messstrecken sind nochmals in Tab. 27 zusammengefasst.

Tab. 27: Absolute Bewegungen der einzelnen Messstrecken der Konvergenzmesstrecken 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	- 23,7 mm	0,8mm/Monat	9,4308 m
KVM 2/2	+ 44,5 mm	2,3 mm/Monat	8,2571 m
KVM 2		-	Σ 17,6879 m
KVM 3/1	+ 10,1 mm	1,8 mm/Monat	5,9165 m
KVM 3/2	- 17,5 mm	0,9 mm/Monat	11,5915 m
KVM 3/3	+ 6,1 mm	0,2 mm/Monat	5,3437 m
KVM 3		-	Σ 22,8517 m

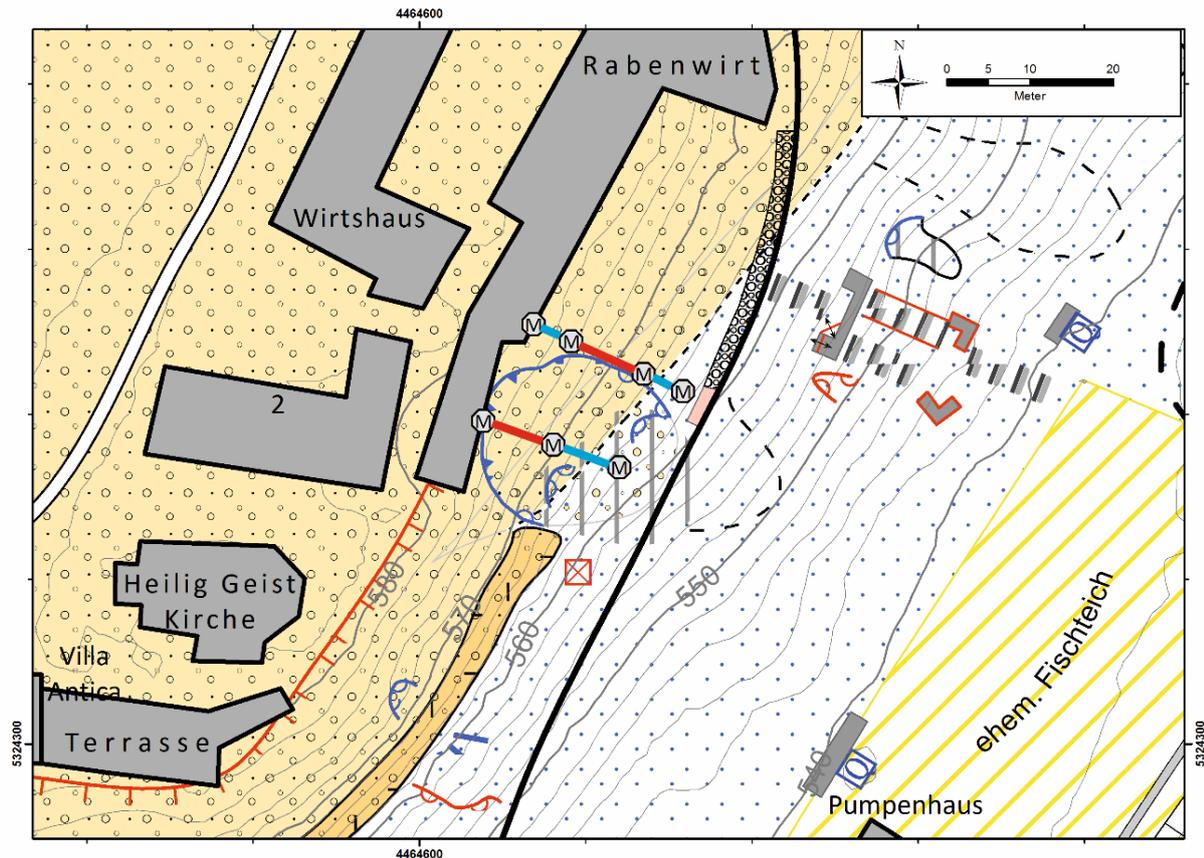


Abb. 41: Die Konvergenzmesstrecken am Rabenwirt / Kirchplatz 1 (KVM 2 + 3), vergrößert aus der Geologischen Karte mit absoluten Abstandsmessungen. Rot = Verkürzung, blau = Verlängerung der Messstrecke. (Stand: 08/2016)

Im ersten Abschnitt der Messstrecke KVM 1 **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 vor und nach Einbau der Sicherungen nur geringe Deformationen gemessen (Verkürzung um 19,9 mm in ca. 2,5 Jahren). 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 14,2 mm. Der Messabschnitt 3 (KVM 1/3), der bis zur ca. 1 bis 2 m mächtigen Konglomeratwand reicht, verkürzte sich um 29,4 mm und zeigt bei ca. der Hälfte der Messungen eine Bewegungsrate > 1 mm/Monat. Somit ergibt sich eine Verkürzung der Messstrecke im Oberhang (Hangkante/Bebauung bis Konglomeratwand) um 3,5 cm. Dies spiegelt kontinuierliche Deformationen in der Hangschuttedecke im Bereich zwischen vernagelter Spritzbetonwand des Hauses Nr. 15 und der stabilen Nagelfluh wider.

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, sechs von neun Messungen zeigen Geschwindigkeiten > 1 mm/Monat, die insgesamt eine Verlängerung von 15,1 mm ergeben.

Die unterhalb der Konglomeratwand anschließenden Konvergenzmessabschnitte KVM 1/4 und KVM 1/5 zeigen Verkürzungen von -2,4 mm (KVM 1/4) und -0,1 mm (KVM 1/5). Die Messstrecke KVM 1/6, die bis an einen großen Baum am Hangfuß reicht, verkürzte sich um -15,2 mm. Die am flach auslaufenden Hangfuß anschließenden Messabschnitte KVM 1/7, 1/8 und 1/9 zeigten keine signifikanten Bewegungen (im Bereich zwischen -3,8 mm bis 0,8 mm), wobei die Bewegungsraten im Messzeitraum keinen eindeutigen Trend zeigen. Wird der Hangbereich unterhalb der Konglomeratwand betrachtet, ergibt sich eine Verkürzung um insgesamt -23,3 mm. Alle absoluten Bewegungen, absoluten Geschwindigkeiten und Längen der KVM 1 sind nochmals in Tab. 28 zusammengefasst.

Tab. 28: Absolute Bewegungen der einzelnen Messstrecken der Konvergenzmesstrecke 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	- 19,9 mm	0,4 mm/Monat	2,3700 m
KVM 1/2	+14,2 mm	0,6 mm/Monat	6,8387 m
KVM 1/3	- 29,4 mm	1,2 mm/Monat	10,6526 m
KVM 1/4	- 2,4 mm	0,3 mm/Monat	14,5339 m
KVM 1/5	- 0,1 mm	0,3 mm/Monat	10,4267 m
KVM 1/6	- 15,2 mm	0,8 mm/Monat	11,4694 m
KVM 1/7	- 3,8 mm	0,3 mm/Monat	11,8288 m
KVM 1/8*	+ 0,8 mm	0,2 mm/Monat	8,7807 m
KVM 1/9*	- 2,6 mm	0,6 mm/Monat	20,3685 m
KVM 1/10**	+ 15,1 mm	0,6 mm/Monat	10,3913 m
KVM 1		-	Σ 107,6606 m

*: Pflock 8 war bei der Messung 2016 umgesägt. Deshalb nur Messungen bis 2015 berücksichtigt.

** : KVM 1/10 verläuft schräg zum Hang

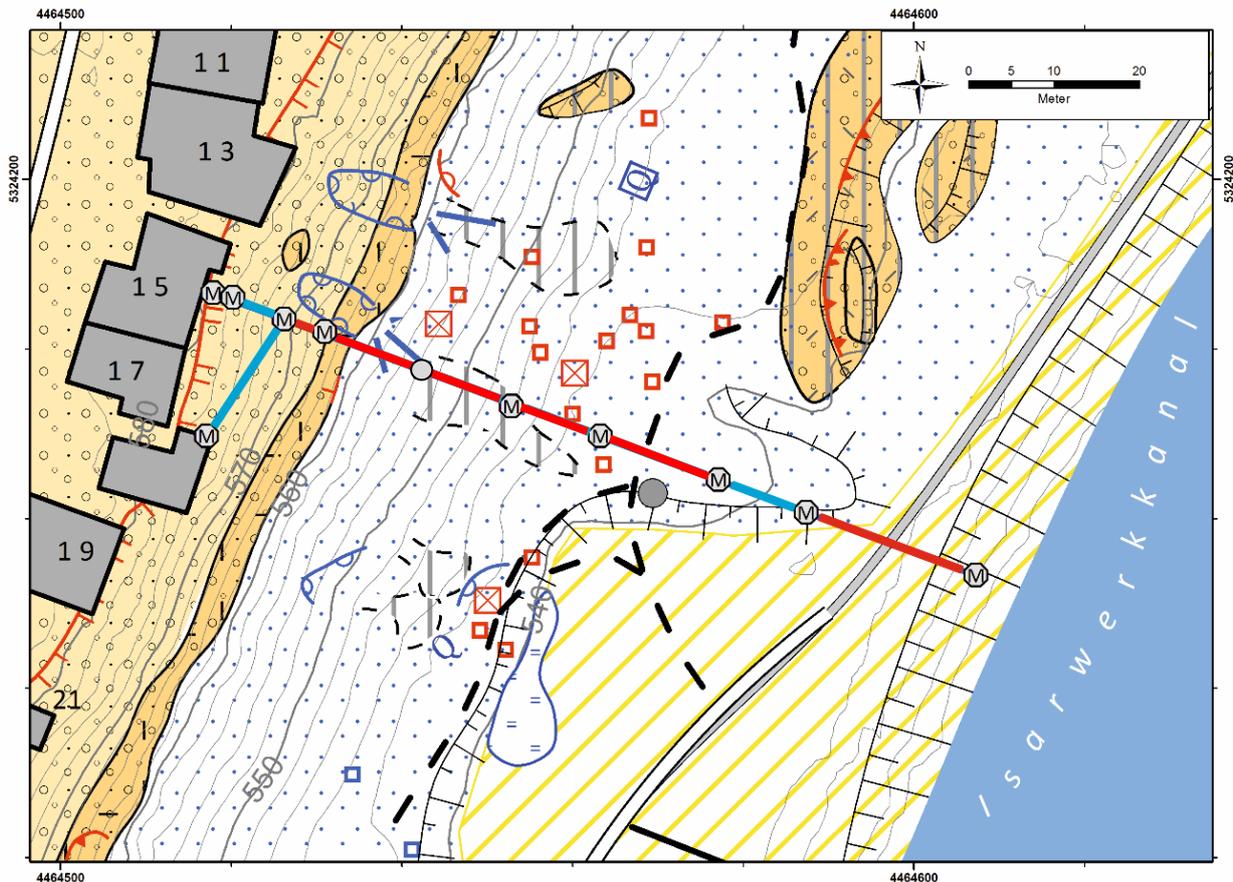


Abb. 42: Die Konvergenzmessstrecken Habenschadenstraße 15, vergrößert aus der Geologischen Karte mit absoluten Abstandsmessungen. Rot = Verkürzung, blau = Verlängerung der Messstrecke. (Stand: 08/2016)

Kommentar:

Im Gegensatz zur Messreihenauswertung aus dem Jahr 2015 (siehe Zwischenbericht 02/2016) zeigten sich in der Messrunde 2016 deutlich beschleunigte Bewegungen bzw. erhöhte Deformationen. Dies trifft i.W. auf die Messstrecke KVM 2 am Rabenwirt und die Messstrecke KVM 1 Habenschadenstraße 15/17 zu. In einzelnen Teilstrecken ergaben sich absolute Änderungen zum Vorjahr 2015 um ca. 1,5 bis 2,5 cm.

Diese Beschleunigungen waren zwar im Rahmen der Messtechnik nicht alarmierend, allerdings war eine fachtechnische Prüfung der Hänge und Messeinrichtungen erforderlich. Diese ergab, dass keine neuen Anzeichen von Kriechbewegungen im Hang erkannt werden können, sondern bewegungsunabhängige Einwirkungen verantwortlich zeichnen. Zum Einen gab es tatsächlich Deformationen an den Messpflöcken durch Auflockerung, zum Anderen kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass durch den Einsatz eines neuen Messgeräts und Messtrupps im Jahr 2016 sich Änderungen ergeben haben.

6.3.3 Ergebnisse der Kluft- und Mauerspione

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 11 Jahren (bis Juni 2016) maximale Bewegungen von $\ll 0,5$ 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 Juli 2016) eine maximale Deformation von 5,6 mm (P2), die allerdings rückläufig ist. Insgesamt sind die Deformationsbeträge ebenfalls gering.

Tab. 29: 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 mm	+ 0,45 mm	+ 0,3 mm
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
19.07.2016	aufgegeben	+ 2,23	+ 2,15	+ 0,16

Tab. 30: Ergebnisse der Kluftspion-Messungen an den Nagelfluhwänden am Treppenweg (Angabe in cm).

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
19.07.2016	heiter, nach mehrtägigem Starkregen	30°	7,775	10,135	kaputt	15,430

Die Messungen in der Nagelfluh zeigen, dass – zumindest 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 über 5 mm Deformation erkennen, die jedoch ebenfalls abklingen.

6.4 Aktualisierung der geologischen Modelle des Isarhangs

Neben der Analyse der Hangbewegungen ist präzise Kenntnis des Untergrundaufbaus im Bereich des Isarhangs erforderlich, um Bewegungsprozesse und Stabilitäten erfassen zu können. Aufgrund der vielfältigen Baugrunddaten der letzten Jahrzehnte (Gutachten, Bohrungen etc.), unserer Kartiererergebnisse sowie neu erstellter geoelektrischer Tomographien können exemplarisch aktualisierte Isarhang-Querprofile vorgelegt werden. Dabei handelt es sich um ingenieurgeologische Schnitte, die klassisch stratigraphische Aspekte nur bedingt berücksichtigen können.

Im Unterschied zu früheren Bearbeitungen verschiedener Institute können jetzt tomographische Aufnahmen einbezogen werden, die bessere Kenntnis über z.B. die Ausdehnung fossiler Rutschkörper, der Erstreckung von Nagelfluh oder Bruchzonen liefern können. Die Ergebnisse sind vielversprechend und werden im Folgenden interpretiert.

6.4.1 Ergebnisse der Elektrischen Resistivitätstomographien

Seit Einreichung des Zwischenberichts von 2016 wurden fünf geoelektrische Profile (ERT, Tab. 2) quer zum Isarhang durch das Fachgebiet Hangbewegung der TU München (Prof. M. Krautblatter) gemessen. Diese ergänzen die Aufnahmen des Hangs (Kartierung, Sondierungen etc.) zu einem ingenieurgeologischen Gesamtbild und ermöglichen eine deutlich verlässlichere Interpretation des geologischen Baus in den ingenieurgeologischen Querprofilen. Die Methodik ist ausführlich in Kapitel 2.6 beschrieben. Die genaue Lage der Transekte ist in Abb. 16 dargestellt.

Zur Interpretation wurden ingenieurgeologische Querprofile entworfen (siehe Kap. 6.4.2). Hier können die geoelektrischen Tomographien an Erkundungsergebnissen (z.B. Bohrungen) geeicht werden.

Im Detail zeigen sich folgende zwei geoelektrische Modellsituationen, die strukturelle Unterschiede vom Norden Pullachs zum Süden erkennen lassen.

Ergebnisse der Transekte 1 bis 4 / Burgweg bis Habenschadenstraße 35

Diese Transekte, die zwischen Burgweg und Kalkofenweg liegen, zeigen relativ einheitliche Verhältnisse.

Feinkörnige Böden, wie der Flinz, weisen die geringsten Widerstände auf (<100-150 Ohm m). Sie sind in den Diagrammen der Anlage 1.7 und Anlage 6 mit blauer Farbe dargestellt. In diese Widerstandsklasse fallen jedoch auch gestörte Böden (technisch: z.B. durch Leitungen, natürlich: z.B. durch Scherzonen, Auflockerungen etc.) oder feinkörnige Füllungen von Nackentälchen. Nagelfluh und Schotter dagegen spannen eine weite Skala von 150 bis zu >1000 Ohm m auf. Die Darstellung erfolgt in gelb bis rot. Die Modellierungen verschiedener Arrays und ihre Auswertung zeigen folgende geoelektrischen Eigenschaften.

-Tone und „gestörte“ Böden: 10 – 150 Ohm m

-dicht gelagerte Schotter und Nagelfluh: 150 – 1000 Ohm m

-Hangschutt / Schuttfuß / Rutschschollen: 500 – 1500 Ohm m

Die Tomographien haben im Schnitt Eindringtiefen von 20 m in den Hang, zum Teil deutlich darüber hinaus, und geben daher Auskunft über Lage und Verbreitung von Schottern oder Nagelfluhkörpern. Zudem können Paläorutschkörper am Talgrund in Verbreitung und Form erkannt werden. Das Vorhandensein kompakter Schotter bzw. Nagelfluh bis in große Hangtiefen ist daher nachweisbar. Sehr gut nachvollziehbar ist dies in Transekt 3 (Habenschadenstraße 1).

Bruchzonen mit Klüften und verstärkter Verwitterungs-Eindringung treten gemäß den Aufnahmen nicht in kritischer Nähe zum Hang auf.

Ergebnisse des Transekts 5 / Hochleite

Dieses Transekt charakterisiert den südlichen Bereich des Rutschschollengebietes (Abb. 16) und zeigt deutliche strukturelle Unterschiede zu den nördlichen Transekten.

Die elektrische Widerstandsverteilung weist ebenso Unterschiede auf.

-Tone und „gestörte“ Böden: 10 – 150 Ohm m

-Terrassenschotter über Nagelfluh: 200 – 400 Ohm m

-Nagelfluh und Deckenschotter: 400 – >1000 Ohm m

-Hangschutt / Schuttfuß / Rutschschollen: 500 – 1500 Ohm m

Die glazialen Schotter werden wenige Meter hinter der Hangkante von einer steilen Zone geringen Widerstands vertikal begrenzt (10 bis 80 Ω m). Zur GOK wird die Zone von ca. 2 bis 3 m mächtigen Schottern, oder ähnlichem Material mit Widerständen von ca. 600 Ω m überlagert.

Nach unten ab etwa 35 m unter GOK nehmen die Widerstände bis auf ca. 160 Ω m zu. An der GOK im Bereich der Hangkante sind keine Anzeichen auf einen Materialwechsel im Untergrund festzustellen. Auch ein im Januar 2016 abgeteuftes Profil aus vier Schweren Rammsondierungen zeigte, dass das anstehende Material keinen mechanischen Unterschied zur „ungestörten“ Schotterterrasse aufweist.

Es gibt zwei geologische Interpretationen [U 31]:

Erstens: Es handelt sich um eine fossile Eiskeilpseudomorphose (Theorie nach Dr. B. Lempe). Im Periglazial der Rissvereisung bildete sich ein Eiskeil in den Hochterrassenschottern, der durch den Permafrost erhalten blieb und saisonal weiter wuchs. Eine ausreichende Verbreitung des Permafrostes im Alpenvorland ist bekannt und es wurden bereits Eiskeile bis in Tiefen von 30 m wissenschaftlich beschrieben (frdl. mündl. Mitt. Dr. B. Lempe). Im Riss-Würm Interglazial schmilzt der Eiskeil und die sich bildende Spalte wird durch den überlagernden, risseiszeitlichen Löß und Hangschutt wiederverfüllt. Die nachfolgenden wärmeiszeitlichen Schmelzwasserschotter überschütteten den ehemaligen Eiskeil und die fossile Eiskeilpseudomorphose konnte bis heute erhalten bleiben.

Zweitens: Es handelt sich um eine Randstörung in Begleitung alter staffelartiger Großrutschungen, die am Hangfuß ja vorliegen. Die Zone entstand also möglicherweise durch große Rotations-/Translationsrutschungen, wobei der hangkantennahe Bereich nur um geringe Beträge bewegt wurde. Die Rutschscholle verharrte in ihrer Bewegung noch im Bereich des Hanges. Die in der Geoelektrik-Messung zu sehende Linse mag also eine gestörte und evtl. verfüllte Zone darstellen, in der geänderte geoelektrische Widerstände vorherrschen. Die äußerste Hangkante ist dann streng genommen bereits Teil des großen staffelartigen Rutschkörpers.

Zum jetzigen Zeitpunkt der Untersuchungen gibt es noch keine gesicherte Interpretation für die „gut leitende Anomalie“ in der Schotterterrasse. Die Randstörung erstreckt sich nach Norden möglicherweise bis in etwa auf Höhe des Kriegerdenkmals.

Kommentar: Mit Hilfe weiterer ERT-Transekte in einem Abstand < 15 m zum Transekt 5 könnte ein dreidimensionales Untergrundbild errechnet werden und die Ausdehnung der Anomalie möglicherweise eingegrenzt werden.

Weiterhin empfehlen sich refraktionsseismische Messungen als Ergänzung zu den ERT-Profilen, um die Festigkeiten der Gesteine im Untergrund genauer zu bestimmen sowie eine elektrische Leitfähigkeitsmessungen charakteristischer Gesteinsproben im Labor zur verfeinerten Kalibrierung.

6.4.2 Repräsentative ingenieurgeologische Querprofile

Die oben beschriebenen Ergebnisse aus Kartierung und technischer Erkundung wurden unter Einbeziehung der geophysikalischen Tomographien in hochauflösende ingenieurgeologische Querprofile übersetzt. Diese zeigen die geologische Situation entlang der fünf ausgewiesenen Transekte (siehe Abb. 16).

Die Ergebnisse sind in Anlage 1.7 dargestellt. In den Profilen werden einheitlich folgende Schichten bzw. geotechnische Homogenbereiche ausgewiesen:

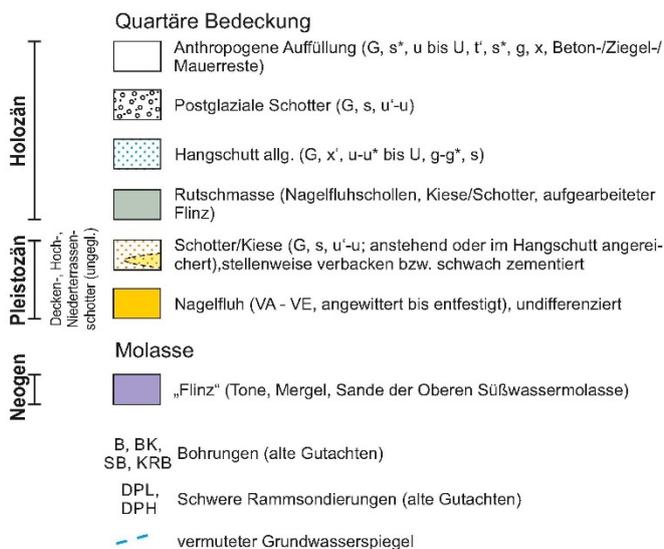


Abb. 43: Ausschnitt der Legende zu den ingenieurgeologischen Querprofilen der Anlage 1.7 (geotechnische Homogenbereiche).

6.5 Auswertung früherer geotechnischer Berechnungen

Im Folgenden werden die in der Vergangenheit durch verschiedene Bearbeiter durchgeführten erdstatischen Berechnungen (Stand sicherheits- und Böschungsbruchberechnungen) zusammengefasst, bewertet und interpretiert. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Untersuchungen unterschiedlichen Vorgaben folgen. Es kann sich um Stand sicherheiten der natürlichen Böschung, aber auch um Verbaue und Sicherungen handeln, ebenso sind die Sicherheitsvorgaben (temporäre oder dauerhafte Zustände...) verschieden. Auch die zugrunde liegenden geotechnischen Baugrundannahmen können deutlich variieren, ebenso die Untersuchungsichte und Verlässlichkeit der Annahmen.

Die Erkenntnisse werden hier zusammengefasst und in eine Interpretation übernommen. Quellen sowie technische Vorgaben sind in Kap. 2.8 angeführt. Tab. 31 differenziert zwischen Berechnungen unter „Normalbedingungen“ sowie solchen unter Extrembedingungen, die zum

Beispiel in verschiedenen Kennwertsätzen modelliert werden (Änderung durch Starkregeneinfluss, Verwitterung etc.) oder durch zusätzliche Lastannahmen, wie z.B. Erdbeben.

Tab. 31: Zusammenstellung durch BBB berechneter geotechnischer Querprofile. Anmerkungen: μ_{\max} bezeichnet den maximalen Auslastungsgrad nach Teilsicherheitskonzept (BLAU), η dagegen kennzeichnet globale Standsicherheiten. In Rot gehalten sind Ergebnisse, die Überlastung bzw. nicht ausreichendes Sicherheitsniveau nach Norm anzeigen

Geotechnische Querprofile	Projekt-Nr.	„Normalbedingungen“	„Extrembedingungen“ (z.B. Starkregen, Erdbeben, besondere Lasten)
Geotechnisches Profil Georg-Kalb-Straße, Großhesselohe [U 13], 2014	03183	$\mu_{\max} = 0,76$ (Hanganbruch)	$\mu_{\max} \sim 1,0$
Geotechnisches Profil Kirchplatz 1 [U 12], 2014	02863	$\mu_{\max} = 0,95$ (Hanganbruch)	$\mu_{\max} \sim 1,11 - 1,32$
Geotechnisches Profil 350 Habenschadenstraße 11 [U 8], 2013	02675	$\eta = 1,25$ (Hanganbruch) $\eta = 2,09$ (Felssturz mit Hanganbruch)	-
Geotechnisches Profil 297 Habenschadenstraße 17 [U 8], 2013	02675	$\eta = 1,35$ (Hanganbruch) $\eta = 1,46$ (Felssturz mit Hanganbruch)	-
Geotechnisches Profil 250 Habenschadenstraße 21 [U 8]; 2013	02675	$\eta = 1,42$ (Hanganbruch) $\eta = 1,47$ (Felssturz mit Hanganbruch)	-
Geotechnisches Profil 110 Habenschadenstraße 25 [U 3], 2008	01103	$\eta = 0,97$ bis $1,36$ (Hanganbruch)	
Geotechnisches Profil 110 Habenschadenstraße 25 [U 4], 2009	01553		$\eta = 1,07$ (Hanganbruch) $\eta = 1,14$ (Felssturz)
Geotechnisches Profil Kalkofenweg [U 5], 2010	01753	$\mu_{\max} = 0,92-0,99$ (Hanganbruch)	$\mu_{\max} = 1,01-1,10$ (Hanganbruch)
Geotechnisches Profil Habenschadenstraße 7 [U 15], 2015	02863-1	$\mu_{\max} < 1,0$ (Hanganbruch)	$\mu_{\max} \sim 1,05$ (Hanganbruch)
Geotechnisches Profil Heilmannstraße 5 [U 16], 2016	03683	$\mu_{\max} = 1,01$ (Felssturz mit Hanganbruch)	$\mu_{\max} = 1,08$ (Felssturz mit Hanganbruch)

Auch zahlreiche Standsicherheitsbetrachtungen anderer Bearbeiter wie Zentrum Geotechnik oder LfU weisen sehr ähnliche Ergebnisse auf, die hier nicht dargestellt werden.

Berechnet wurden i.W. Hanganbrüche (Gefährdungsbild B) sowie Böschungsbrüche, die dem Versagen nach Gefährdungsbild C (Felssturz mit Hanganbruch) entsprechen. Großrutschungen lassen sich nicht hinreichend genau modellieren und sind daher ausgenommen.

Die Ergebniszusammenstellung lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

- ➔ Die Hangsituation im Bereich der Rechenschnitte zeigt sich nach Teilsicherheitskonzept im permanenten Zustand (BS-P) als in einigen Fällen bereits ausgelastet bzw. überlastet, die Auslastungsgrade überschreiten $\mu > 1,0$. Dies betrifft verschiedene Rechenverfahren (Gleitkreisverfahren oder kombinierte Verfahren mit Klüften; Blockgleitmethode...). Auch nach globalem Konzept unterschreiten die errechneten Ergebnisse mehrmals die geforderten Sicherheiten: $\eta < 1,3$
- ➔ Noch deutlicher wird der Grad der Auslastung / Überlastung bei Betrachtung von Extrembedingungen (Starkregen, Erdbeben, Kennwertverschlechterung durch Verwitterung u.a.).
- ➔ Eine exemplarische Rückrechnung unter temporärem Zustand (BS-T) im Teilsicherheitskonzept zeigt noch Auslastungsgrade unter $\mu = 1,0$, was ausreichend im temporären Zustand ist (BS-T mit verringerten Teilsicherheitswerten).
- ➔ Diese Beobachtungen bedeuten, dass größere Hangabschnitte in Pullach rechnerisch nicht mit der nach Norm ausreichenden Sicherheit nachweisbar sind. Es lässt sich vielmehr vermuten, dass es noch ungünstigere Situationen geben kann.
- ➔ Der kritische Versagensmechanismus eines Abbruchs einer größeren Nagelfluhpartie mit Abriss überlagernder Schotter bis zur Hangkante (analog 1962, Gefährdungsbild C) ist zudem noch gesondert zu betrachten. Ausgeprägte Nagelfluh-Überhänge, die die Wahrscheinlichkeiten eines Abbruchs erhöhen, sind in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

Der Isarhang ist also – zumindest lokal - nach Definition des EC7 bereits „überlastet“, das Gesamtsystem befindet sich in der rechnerischen Reserve.

Dies ist eines der Ergebnisse, die im Zusammenspiel mit den im Gelände definierten Gefährdungsbildern und regionalen Differenzierungen (siehe Kap. 6.6) dazu führen, dass in spezifischen Gebieten Nachuntersuchungen angestellt werden müssen, die entsprechende Maßnahmen bedingen werden (Überwachung, Sanierung brüchiger und absturzbedrohter Konglomeratpartien, Handlungsempfehlungen, siehe Kap. 6.7 und Kap. 8).

6.6 Erstellung des Geo-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 „Geo-Atlas“ – Quantifizierungen und regionale Differenzierungen in Prozesskarten für die verschiedenen Gefährdungsbilder, also 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 liegt bei den gegenständlichen Prozesskarten ein wesentlich größerer Maßstab und somit 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 43] 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. Diese Karten werden als **Gefahren-Hinweiskarten** bezeichnet.

In einem weiteren Schritt werden die Ablagerungsbereiche der so erstellten Gefahren-Hinweiskarten über Gelände- und Recherchebefunde im Hinblick auf Eintretenswahrscheinlichkeit und Intensität bewertet. Das Resultat ist schließlich eine **Prozesskarte bzw. Gefahrenkarte**. 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“ bzw. „Gefahr“ einen physikalischen Prozess im Rahmen der natürlichen Gegebenheiten beschreibt, nicht jedoch Auswirkungen und Risiko. Diese sind in weiteren Schritten durch Gemeinde und Entscheidungsträger zu definieren und in Kooperation mit Fachplanern in ein Risikomanagement, Gefahrenzonenpläne und Maßnahmenkataloge zu übersetzen.

Als eine Maßnahme wären dann u.U. grundstücksscharfe Begutachtungen und Sanierungsplanungen zu nennen. Ein Beispiel dafür ist unser geologisches Gutachten zur

Stabilität des Hangs in der Wenzsiedlung [U 17] mitsamt geotechnischer Entwurfsplanung der Sanierung [U 18]. Diese Detailleistung kann der Geo-Atlas trotz seiner vergleichsweise hohen Auflösung unmöglich bieten.

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 anhand von Geländebefunden eingestuft, 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 43] wie auch in Kap. 6.6.4.

Der Prozess der Gefährdungsanalyse für den Geo-Atlas Pullach kann wie im Diagramm der Abb. 44 zusammengefasst werden.

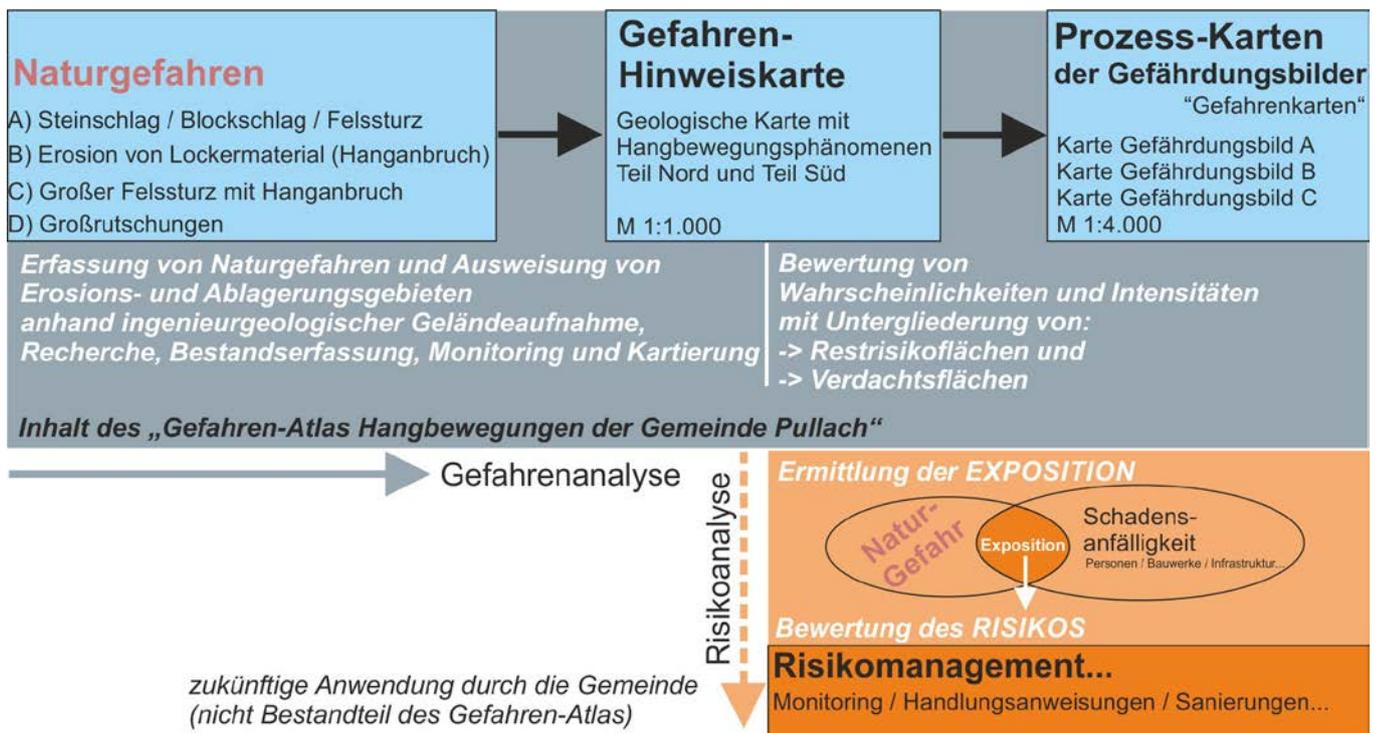


Abb. 44: Darstellung der Arbeitsschritte und des Leistungsumfangs des „Geo-Atlas Hangbewegungen“: Von der lokalen Erkennung von Naturgefahren, deren regionaler Erfassung bis hin zur „Gefahrenkarte“. Diese wird dann in weiteren Schritten Grundlage der Risikoanalyse und des Risikomanagements sein.

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. 32: 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)

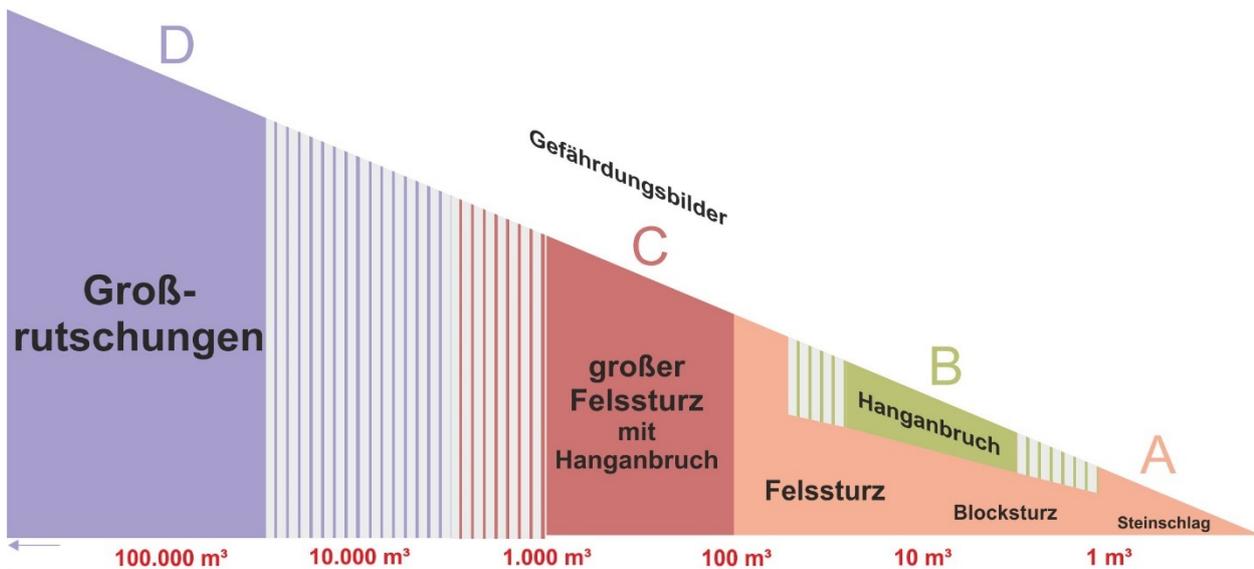


Abb. 45: Verteilung der bewegten Kubaturen / Intensitäten der verschiedenen Gefährdungsprozesse. Derr Übergang von großen Felsstürzen mit Hanganbrüchen zu Rutschungen großer Hangbereiche ist fließend.

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.

Eigenverformung des Untergrunds bedingt. Ein Großteil der Energie eines einschlagenden Blocks oder einer Felsmasse wird bereits vernichtet, der Rückprall ist gering.

Rauheitswert 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 Sturzsollen 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**. 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 Auswerteschema werden den identifizierten Flächen Gefährdungsgrade zugewiesen. Hierbei werden auch ergänzende Daten (aus messtechnischer Überwachung, Zeugen,

Frequenzanalyse...) berücksichtigt. Der theoretische Hintergrund wird in [U 43] ausführlich dargelegt.

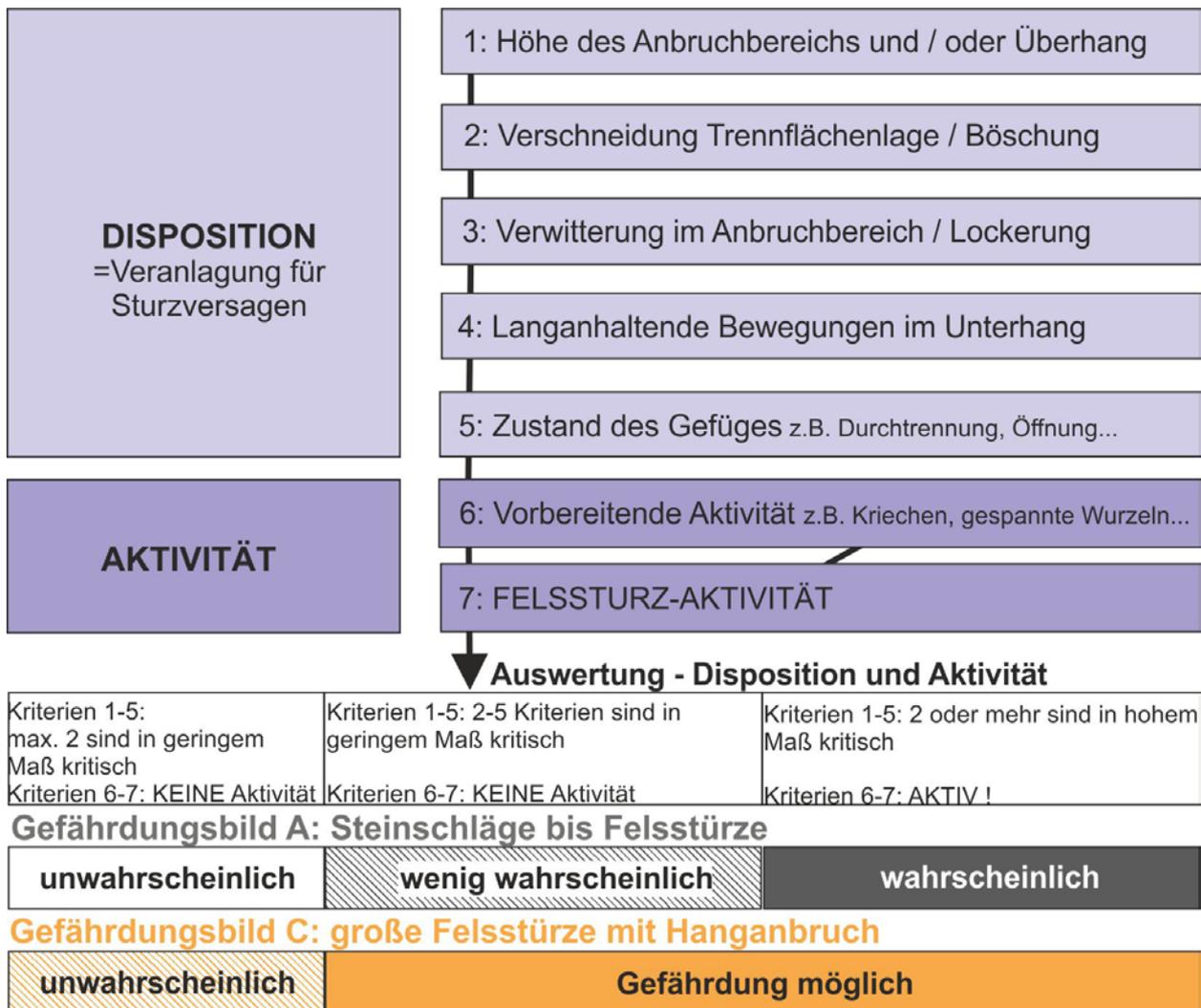


Abb. 47: Prozess der Wahrscheinlichkeitsermittlung für Sturzprozesse (Gefährdungsbilder A und C).

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 (Hanganbruch, Gefährdungsbild 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
- > betrunkenen Wald
- > Kriechindikatoren

Kommentar: Großrutschungen (Gefährdungsbild D) werden in diesem Bericht nicht probabilistisch gewertet. Geotechnische Messungen zeigen keine kritischen Deformationen.

Eine Fortführung der messtechnischen Beobachtung bzw. eine Ausweitung des Messnetzes um stillgelegte und eventuell neue Messstellen sowie neue Konvergenzmessstrecken soll eine langfristige Überwachung und Interpretation großräumiger Bewegungen ermöglichen.

Übersetzung in Wiederkehrperioden / Jährlichkeiten

Die folgende Einstufung soll eine Vorstellung davon geben, mit welchen ungefähren Wiederkehrdauern bei den verschiedenen Gefährdungen zu rechnen ist. Dies ist eine erfahrungsmäßige Klassifizierung, die zur Veranschaulichung dient und nicht auf statistischer Auswertung basiert.

Tab. 33: Empirisch ermittelte Aktivität und Jährlichkeit der definierten Gefährdungsbilder.

Gefährdungsbilder	Restrisiko	Gefährdungsverdacht mäßig	Gefährdungsverdacht erhöht
A: Steinschlag	>50 Jahre	5-10 jährig	kontinuierlich
A: Blockschlag	>100 Jahre	5-10 jährig	jährlich bis 5 jährig
A: Felssturz bis 100m ³	>200 Jahre	50 jährig	50-100 jährig
B: Hanganbruch	>50 Jahre	jährlich-50 jährig	
C: Großer Felssturz mit Hanganbruch	>500 jährig	100-500 jährig	
D: Großrutschungen	1000-jährig		

Gefährdungsmatrix

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

Prozesskarten der Gefährdungsbilder (Gefahrenkarten)

Der Geo-Atlas Hangbewegungen umfasst als Auswertungsergebnis drei Gefahrenkarten, die den derzeitigen Zustand des Pullacher Isarhangs beschreiben. Sie behandeln die Gefährdungsbilder A, B und C. Das Gefährdungsbild D (Großrutschungen) dagegen ist regional nicht differenzierbar. Gefährdungen können lediglich aus messtechnischen Beobachtungen abgeleitet werden.

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 lokale Untersuchungen erforderlich, um eine Verdachtsfläche näher zu präzisieren (z.B. spezielle Vermessung, Gefügaufnahme, Sondierung, Geophysik).

6.6.3 Gefährdungsgrade – regionale Auswertung

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 offensichtlicher 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.

In folgenden Fällen (Tab. 34) sind einige exponierte Felsbereiche identifiziert, die die entsprechenden Dispositionsmerkmale exemplarisch veranschaulichen und die selbstverständlich in Flächen erhöhten Gefährdungsverdachts der Gefahrenkarte A (Anlage 1.4) eingeordnet werden (siehe auch Fotodokumentation in :

Tab. 34: Ausgewiesene Beispiele anbruchgefährdeter Nagelfluhaufschlüsse ab mindestens 5m³ (großer Blocksturz bis Felssturz) als Ergebnis der ingenieurgeologischen Kartierung 1:1.000 (siehe Anlage 5).

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.
Hang unterhalb Heilmannstraße 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.
Hang unterhalb Heilmannstraße 7	Gefährdung A: Blocksturz bis Felssturz Sehr weit überhängende, stark zementierte Konglomeratwand mit hangparallelen Klüften, unterlagernde Schotter bereits erodiert bzw. abgerutscht.
Hang unterhalb Villa Antica	Gefährdung A: Blocksturz bis Felssturz Überhängender Konglomeratbereich mit Klüften, teilweise mit Ziegelmauer verbaut, S' älterer Konglomeratabbruch
Hang unterhalb 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.

Daneben schließen sich auch weitere Verdachtsflächen für größere Blockstürze und Felsstürze an. So wurde eine mäßiger Gefährdungsverdacht in und um den Bereich des ehemaligen Felssturz von 1962 ausgewiesen. Hier kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass sich aus der

freigelegten Nagelfluh wieder Sturzblöcke lösen werden. Unterhalb Burgweg 2 selbst ist eine Sicherung der auskragenden Konglomeratplatte eingebracht, die ein Großversagen (Felssturz mit Hanganbruch, Gefährdungsbild C) verhindert. Nachstürzende Steine oder auch Blöcke sind jedoch nicht auszuschließen.

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. 34) 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. Mit Ausnahme des durch Anker und Spritzbeton lokal gesicherten und messtechnisch überwachten (Kluftspione) Abschnitts unterhalb Burgweg 2 wird der Gesamtbereich als Verdachtsfläche eingestuft.

Tab. 35: Gegen Gesamtversagen gesicherter Nagelfluhabschnitt unterhalb Burgweg 2. Kleinere Sturzprozesse, die sich aus der Wand lösen sind jedoch nicht ausgeschlossen.

Hang unterhalb Burgweg 2	Sanierte 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.
--------------------------	---

Hier muss angemerkt werden, dass eine präzisere Aussage zur Wahrscheinlichkeit und somit zum Gefährdungsgrad erst mit weiteren Spezialuntersuchungen ermöglicht wird. Dazu gehören z.B. Gefügeaufnahmen und Monitoring.

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 23] 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. Lediglich im Süden des Arbeitsgebietes, im Bereich der Grünwalder Brücke, sind kontinuierlich laufende Kriechprozesse erkennbar. Dies entspricht auch den Erkenntnissen der geoelektrischen Untersuchungen, die Unterschiede des hangtektonischen Bildes vom Norden zum Süden erkennen lassen.

Die bestehende Gefährdung wird – unter Voraussetzung eines fortgeführten Monitoring – zum jetzigen Zeitpunkt als Restrisiko eingestuft.

6.6.4 Signaturen und Kartendarstellung

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

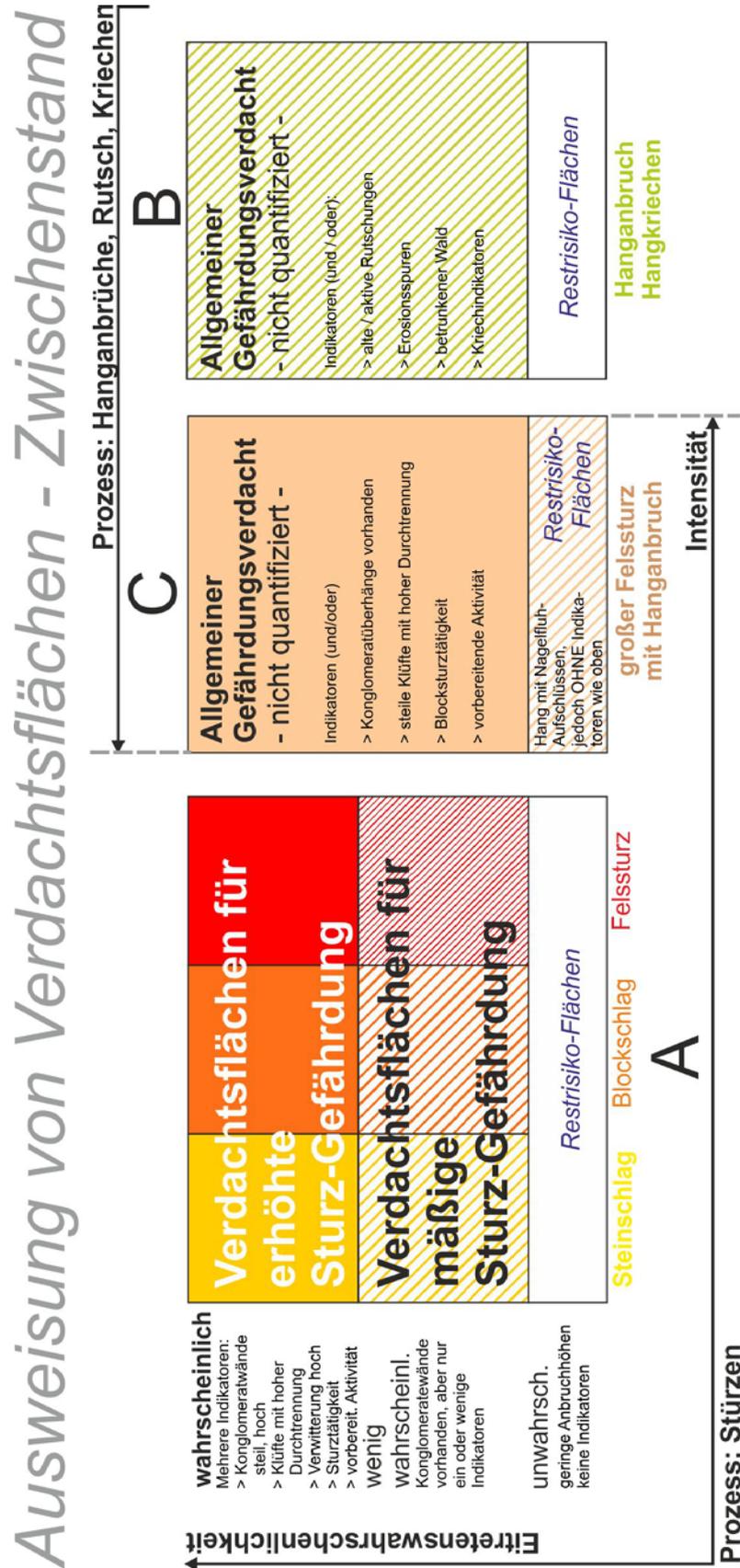


Abb. 48: Gefährdungsmatrix der Sturz- und Rutschprozesse gegliedert nach Gefährdungsbildern A, B und C.

6.7 Ergebnisse der Gefährdungsanalyse mit Stand vom 15.3.2017

Die im Rahmen der Erstellung des Geo-Atlas Hangbewegungen durchgeführte Gefährdungsanalyse führt zu folgenden Ergebnissen:

Generelle Stabilitätssituation

Das Pullacher Isarhochufer ist geologisch jung und vergleichsweise steil. Die gut dokumentierte und hier erstmals recherchierte Hangbewegungshistorie belegt die aktive und fortschreitende Erosion des Hanges. Großräumige erosive Rückverlagerungen finden zwar in geologischen Zeiträumen statt (hier Jahrtausende), die Einzelprozesse und Ereignisse sind aber statistisch so häufig, dass sie Gefährdungen darstellen. Diese „Ereignisse“ wurden in dieser Studie klassifiziert und probabilistisch bewertet. Die Gefahrenkarten A, B und C geben die präzise räumliche Verteilung wider.

Erdstatische Analysen von Böschungsstabilitäten der vergangenen Jahrzehnte belegen zudem, dass das Pullacher Isarhochufer auch rechnerisch als grenzstabil einzustufen ist.

Gefährdungsschwerpunkte

Im Folgenden werden Gefährdungsschwerpunkte (1 bis 3, Abb. 49) ausgewiesen, die durch Kombinationen von Gefährdungsbildern charakterisiert sind und die als Ergebnis dieses Berichts einer weiteren Untersuchung – in unterschiedlichem Ausmaß – bedürfen (siehe Kap. 8).

Diese drei Schwerpunkte ergeben sich aus der generalisierenden Überlagerung der Prozesskarten. Dabei wurden Prozesse / Gefahren mit geringer Wahrscheinlichkeit oder Intensität außer Acht gelassen (d.h. keine Steinschläge, keine Flächen mäßigen Gefährdungsverdachts, keine Restrisikobereiche). Fokus liegt auf Flächen erhöhten Gefährdungsverdachts ab Blocksturz-Intensität.

- Schwerpunkt 1: Kirchplatz 1 bis Habenschadenstraße 21
- Schwerpunkt 2: Heilmannstraße 7 bis Burg Schwaneck
- Schwerpunkt 3: Hochleite – Joseph-Breher-Weg Süd

Großrutschungen

Die Großrutschungssituation ist im momentanen Zustand als stabil einzustufen. Geoelektrische Messungen zeigen, dass im Süden (Hochleite) ein Gefährdungsverdacht besteht (Schwerpunkt 3 in Abb. 49).

Felssturz mit Hanganbruch

Hier können Verdachtsbereiche definiert werden, in denen die Disposition für Ereignisse dieser Art gegeben ist (Schwerpunkte 1 und 2 in Abb. 49). Dieser Versagensmechanismus ist i.W. an die Stabilität der „Nagelfluh-Bewehrung“ des Hangs gebunden.

Stürze und Hanganbrüche

Die regional differenzierte Sturzgefährdung konzentriert sich ebenfalls in den Schwerpunkten 1 und 2 in Abb. 49.

Hanganbrüche

Die Gefährdung von Hanganbrüchen im Oberhang (analog Rabenwirt 2013) ist besonders im Schwerpunktbereich 1 in der Habenschadenstraße zusätzlich auszumachen.

Folgerung

Aufgrund der Ergebnisse mit Stand vom 15.3.2017 werden konkrete Sanierungen (Fußgängerwege, instabile Felsplatten...) und Nachuntersuchungen empfohlen (siehe Abb. 49, und Kap. 8). Hier muss speziell auf die nötige geotechnische Begutachtung und Instandhaltung der Nagelfluh als stützendes Hangelement hingewiesen werden sowie auf die Aufarbeitung der komplexen, noch nicht hinreichend detailliert untersuchten und beobachteten Hangsituation in der sehr dicht in Hangkantennähe besiedelten Habenschadenstraße. Hier empfehlen wir zudem die Errichtung einer Bohrlochmessstelle.

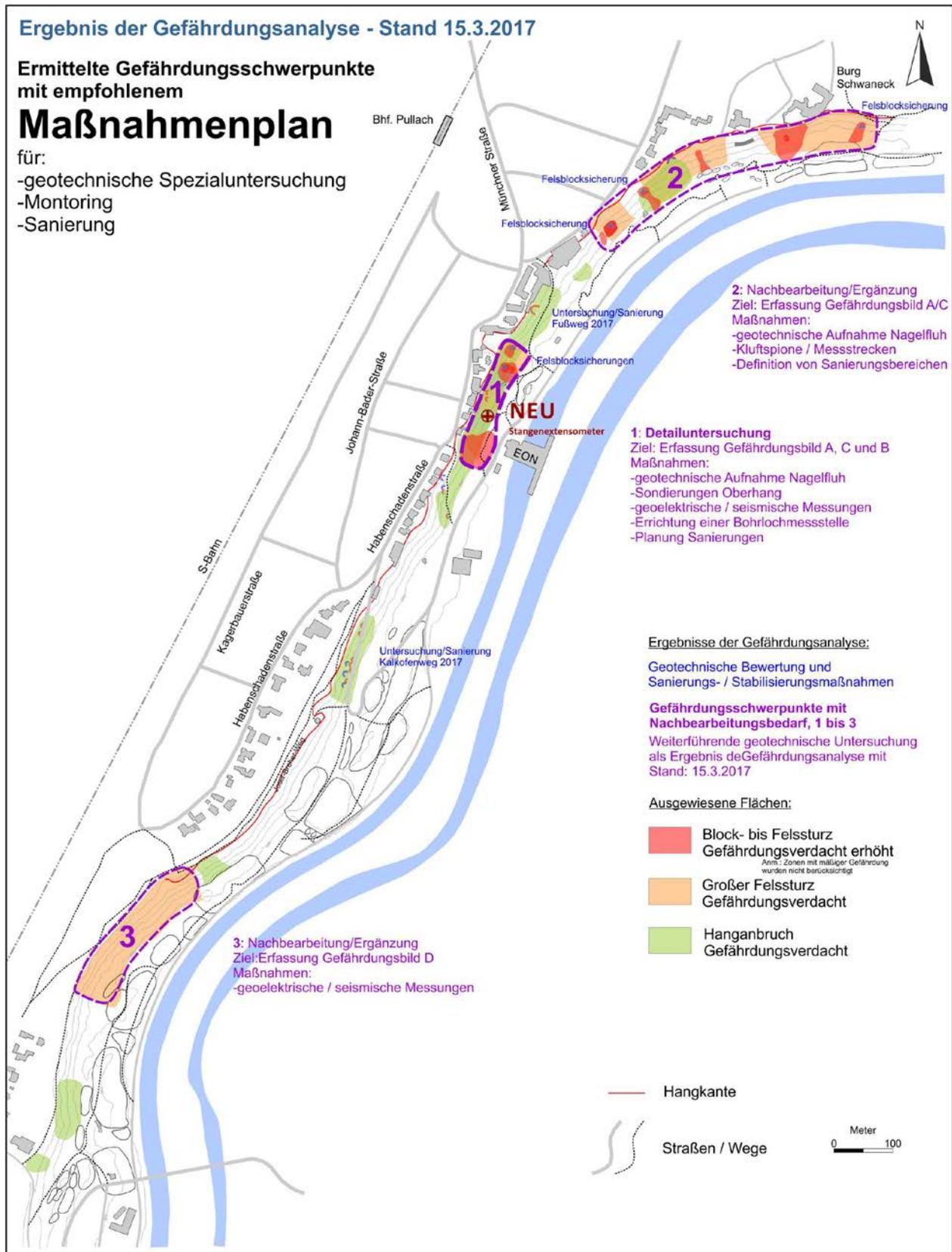


Abb. 49: Ergebnis der Gefährdungsanalyse mit Ausweisung von Gefährdungsschwerpunkten mit Bedarf an Spezialerkundung/Untersuchung sowie Einzelobjekten mit umzusetzenden Sanierungs- / Stabilisierungsmaßnahmen, die z.T. schon initiiert sind.

7 Anwendung des Geo-Atlas Hangbewegungen

7.1 Leistungsumfang

Der Geo-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 Isarhochufer. 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 Prozesskarten der Gefährdungsbilder („Gefahrenkarten“) dargestellt. Diese Karten stellen die mit dem derzeitigen geowissenschaftlichen Kenntnisstand höchstauflösende Gefährdungseinschätzung dar.

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

7.2 Anwendungsmöglichkeiten

Der Geo-Atlas Hangbewegungen kann als Planungswerkzeug für die Gemeinde oder private Bauherren dienen. Die Einsatzmöglichkeiten der Daten und Kartensätze sind vielfältig.

- Gefahrenhinweise für behördliche Entscheidungsprozesse und Bauleitplanung
- Grundlage des behördlichen Risikomanagements
- Grundlage zur Planung geotechnischer Erkundungskonzepte
- Ermöglichung der Prävention und Sanierungsplanungen
- Grundlage zur Erstellung von Überwachungskonzepten, Alarmsystemen und technischen Handlungsanweisungen

Einige dieser Anwendungen werden in Kap. 8 bereits in Grundzügen angedacht und entworfen, wie beispielsweise das geotechnische Monitoringprogramm.

7.3 Ausführungen zur GIS-Einbindung

Ein weiterer Aspekt des Geo-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 2.9 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 bei Bedarf samt Erläuterung an die Gemeinde übergeben.

8 Folgerungen / Ausblick

Die Gemeinde besitzt als Ergebnis der mehrjährigen Studie nun ein fertig gestelltes GIS-fähiges Werkzeug zur Gefahrenerkennung am Isarhang von der Burg Schwaneck bis zur Grünwalder Brücke. Damit können mit hoher Genauigkeit Hangbewegungsgefährdungen eingestuft und betroffene Gebiete ermittelt werden. Zudem liegt eine umfassende Datenbasis aller Erkundungen, Messstellen und Schadensfälle vor.

Als weiteres Ergebnis zeigt sich unseres Erachtens aber auch, dass aufgrund großflächiger Betroffenheit und sehr hangnaher Nutzung und Bebauung ein geänderter, risikobewusster und v.a. vereinheitlichter Umgang mit der Gefahrensituation erforderlich ist.

In diesem Kapitel werden wir daher vorausschauend Konsequenzen aus der erstellten Gefährdungsanalyse ziehen und Maßnahmen aufzeigen sowie weitere Empfehlungen geben.

8.1 Geotechnisches Monitoring und Ausbau Messstellennetz

Die Gemeinde Pullach kann über ein vergleichsweise dichtes Messstellennetz verfügen, das eine Überwachung des Isarhangs ermöglicht. Die Baugeologische Büro Bauer GmbH hat die technische Koordinierung übernommen, diese Überwachungsmessungen für die Gemeinde zusammenzuführen und in Zukunft zentral auszuwerten. Dazu wurde bereits Kontakt zu Betreibern / Eigentümern hergestellt. Zudem wurden Vereinbarungen mit dem LfU getroffen zur Übernahme von Messdaten.

Tab. 36: Vorgeschlagenes Monitoringprogramm der Gemeinde Pullach (Start 2017).

Messstellenart	Betreuung / Messfrequenz	Messstellen (siehe Tab. 20, Tab. 21, Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Tab. 23)	Auswertung	Monitoringbericht (jährlich, durch BBB)
Bohrlochmessstellen	LfU / 3x jährlich	HB-1/SB-4/GMB2/B1/B9/B3-1	Bewertung gemeinsam mit LfU	
Bohrlochmessstellen	BBB / 1x jährlich	NMB-1/GMB2/TVB3/B2a	Bewertung durch BBB	
Geodätische Messprofile	LfU / bei Bedarf	Messprofil 5	Bewertung gemeinsam mit LfU	
Konvergenzmessstrecken	BBB / 1x jährlich	KVM-1-4 (sowie neue KVMs)	Bewertung durch BBB	
Kluft- und Mauerspione	BBB / 1x jährlich	M1-P4 (insg. 8) sowie neue Spione / Crackmeter	Bewertung durch BBB	

Teile der Bohrlochmessstellen werden 3x jährlich vom LfU gemessen. Andere Messstellen werden vom BBB übernommen. Oberflächenmessstellen werden zum Großteil von BBB gemessen. Wir schlagen zudem weitere Konvergenzmessstrecken und Kluftspione vor, deren Einrichtung im Rahmen zukünftiger Arbeiten erfolgen soll.

Einmal jährlich ist ein Monitoringbericht an die Gemeinde vorgesehen. Darin werden die aktuellen Messungen und Deformationskurven dargestellt und interpretiert. Die Messbedingungen (Wetterlagen etc.) und besondere Ereignisse werden notiert und notwendige Maßnahmen erläutert. Nach den ersten 3 Jahren Datensammlung können dann die Bestandsdaten in Alarmwerte übersetzt werden.

Außerdem schlagen wir vor, im Bereich des Gefährdungsschwerpunkts 1 (Habenschadenstraße) eine weitere **Bohrlochmessstelle** einzurichten, um Deformationen des Flinz-Untergrundes im Vorfeld eines potentiellen größeren Versagens beweissichern zu können. Hier besteht unseres Erachtens eine Messlücke im Messstellennetz, die behoben werden sollte.

Außerdem empfehlen wir in Schwerpunktbereich 2 die Stabilität von Nagelfluhwänden mit sog. **Crackmetern** zu überwachen. Dabei handelt es sich um sehr störungsarme hochgenaue elektronische Rissmesser, die Längenänderungen potentiometrisch erfassen und automatisch mittels Datenlogger ausgelesen werden können.



Abb. 50: Linearer Potentiometer-Rissmesser (Crackmeter). (aus: www.geokon.com)

8.2 Aktualisierungen des Geo-Atlas

Im Zweijahresrhythmus sollte die Datenbank des Geo-Atlas Hangbewegungen aktualisiert werden. Folgende Informationen sollen eingearbeitet werden:

- neue Erkundungsergebnisse (z.B. aus Baugrunduntersuchungen, Messungen)
- erfolgte Sanierungen / Sicherungen, inklusive Berücksichtigung in Gefahrenplänen!
- Geländebegehung mit Prüfung / Aktualisierung der Hangsituation und Aktivität
- Einarbeitung Messdaten
- Einarbeitung baulicher Änderungen (Wege, Straßen, Bebauung) soweit erforderlich

8.3 Weiterführende ingenieurgeologische Detailuntersuchungen

Die Ergebnisse der Gefährdungsanalyse zeigen auf, dass erweiterter ingenieurgeologischer Bearbeitungsbedarf in drei Schwerpunktgebieten besteht. Dies ist bereits in Kap. 6.7 erläutert. Die Maßnahmen sind in Abb. 49 zusammengefasst. Der Schwerpunkt 1 erfordert eine detaillierte geotechnische Untersuchung, während die Schwerpunkte 2 und 3 im Rahmen von Nachuntersuchungen zu sehen wären.

SCHWERPUNKT 1: Kirchplatz 1 bis Habenschadenstraße 1

In diesem Hangabschnitt bestehen noch deutliche Unklarheiten bezüglich des geologischen Baus und speziell der Konglomerierung der Terrassenschotter sowie zum mechanischen Zustand der Nagelfluh. Teilweise wurden in den letzten Jahren bereits von privater Seite Hangsicherungen eingebracht (z.B. Habenschadenstraße 15 und 7). Eine Gesamtbetrachtung sollte erfolgen und aufgrund der hangnahen Bebauung im Detail mehrere Maßnahmen umfassen:

- Detaillierte grundstücksscharfe strukturgeologische Aufnahme der Nagelfluh und der Hangprofile
- 3-5 geoelektrische und seismische Profile
- Kleinrammbohrungen zur flächenmäßigen Ermittlung des Konglomerierungsgrades im Terrassenschotter oberhalb der Nagelfluh
- Einrichtung einer tiefen Bohrlochmessstelle, die bis in den tertiären Flnz reicht, sowie ergänzender Konvergenzmessstrecken, eventuell Überwachung per elektrischer Rissmesser
- Sanierungs- und Sicherungsempfehlungen und -planungen

SCHWERPUNKT 2: Heilmannstraße 7 bis Burg Schwaneck

Hier soll die Gefahr durch große Sturz- und Bruchprozesse, im Speziellen solcher analog 1962, noch präziser erfasst werden und Vorsorge getroffen werden.

- Nagelfluhbegutachtung
- Einrichtung ergänzender Konvergenzmessstrecken / Kluftspione sowie elektrischer Rissmesser zur Kluftüberwachung
- Eventuelle Sanierungsempfehlungen und -planungen

SCHWERPUNKT 3: Hochleite – Joseph-Breher-Weg Süd

Geophysikalisch als auch hangbewegungstechnisch unterscheidet sich der südliche Gemeindebereich deutlich vom nördlichen. Im Süden treten aktive Bewegungen an der Grünwalder Brücke auf, sowie eine markante Rutschschollenlandschaft. Das in der Geoelektrik erkannte strukturelle Bild soll fachlich verifiziert und weiter interpretiert werden.

- 2 geoelektrische und seismische Profile
- Einrichtung ergänzender Konvergenzmessstrecken

8.4 Kommentar zu Risikoanalyse und Risikomanagement

Die als Gefährdung beschriebenen physikalischen Prozesse sind wie erwähnt definitionsgemäß nicht mit Risiken gleichzusetzen. Erst die Ermittlung der Exposition ermöglicht eine Übersetzung in das Risiko (siehe Abb. 44). Unter Exposition versteht man, die Überlagerung von schadensanfälliger menschlicher Nutzung (z.B. Fußwege, Häuser, Infrastruktur...) durch Gefahrenflächen, also z.B. den Ablagerungsbereich von Blockstürzen. Erst damit kann ein Risiko definiert und auch eingestuft werden (Risikoanalyse).

Diese Risiken sind durch die Gemeinde in Kooperation mit Fachplanern zu definieren und zu behandeln, so wie es i.Pr. schon für Einzelfälle seit Jahrzehnten geschieht. Beispiele sind im großen Maßstab die geotechnische Planung des Bürgerhauses, im kleineren Maßstab Rutschungssanierungen am Treppenweg, die Betrachtung der Auswirkungen eines Schwertransports in Hangkantennähe und anderes mehr.

Es stellt sich also die Frage, welche Risiken inakzeptabel sind und Maßnahmen erfordern (z.B. Sperrung von Fußwegen wegen akuter Hanganbruchgefahr) und welche als Restrisiko eingestuft werden können (z.B. mäßige Steinschlaggefährdung bei Wanderwegen).

Im Fall des Isarhochufers muss die Risikoanalyse in folgende Richtungen gehen:

Risiko: Nutzung der Infrastruktur (Wege, Straßen, Freizeitnutzung...)

Das Isarufer ist speziell im Sommer hochfrequentiert. Auch gesperrte Fußwege werden benutzt, wie beispielsweise der Fußweg vom Bürgerhaus zur Isar. Hier wird die nicht sanierte Rutschung unterhalb des Rabenwirts gequert. Ein zweiter aktueller Fall ist der Kalkofenweg, der durch Sackungen und Steinschlag beeinträchtigt ist. Beide Fälle werden aktuell vom BBB bearbeitet. Wichtige Bearbeitungspunkte sind in Abb. 49 zu sehen.

Weitere Nutzungen durch z.B. Wanderwege etc. sollten auf Exposition geprüft werden.

Risiko: Bauwerke / Bebauung

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse von Standsicherheitsuntersuchungen in Kapitel 2.8 zeigt sich die Problematik im Umgang mit Bebauung in Hanglage. Dies betrifft v.a. die Situation im Bereich Kirchplatz 1 bis Habenschadenstraße 21. In diesem Fall sind weitere Erkundungen angeraten sowie die Erstellung einer tiefen Bohrlochmessstelle. Damit kann die quantitative und qualitative Erfordernis von Sanierungs-/Sicherungsmaßnahmen ermittelt werden.

Im Allgemeinen bedeutet dieser Gefährdungs- und Risikozustand auch Auswirkungen an Anforderungen für zukünftige Bauprojekte und Bauleitplanung.

Neben fachlicher und messtechnischer Überwachung wie in diesem Bericht empfohlen sowie nötigen Sicherungen / Sanierungen, muss ein generalisierender Katalog mit Handlungsanweisungen aufgestellt werden (siehe Kap. 8.6).

8.5 Empfehlung eines Katalogs an Sanierungskonzepten

Die gewonnenen Erkenntnisse über Hangbewegungsgefährdungen und Schadensfälle der Vergangenheit können in einen Katalog von technischen Sanierungsmaßnahmen eingehen. Hier kann speziell auch die Erfahrung aus früheren Sanierungen ausgewertet werden, um wirtschaftlich Lösungen darzustellen und zu planen.

Dieser Sanierungskonzept-Katalog sollte nach Prozessart, Schadensbild und -ausmaß, Risikoabstufung und Schutzmechanismus gegliedert sein. Diese Einschätzungen können als behördlichen und privaten Nutzern bereits eine Einschätzung notwendiger und auch möglicher Maßnahmen geben (Entwurf, Kalkulation etc.).

8.6 Empfehlung Handlungsanweisungen

Gezielte Handlungsanweisungen sollen dafür sorgen, dass keine zusätzlichen Verschlechterungen der geologischen, morphologischen und hydrologischen Bedingungen auftreten können. Folgende Punkte müssen berücksichtigt werden:

- Bebauung / An- und Umbauten in Hangkantenlage nur mit geotechnischen Nachweisen
- keine Einleitung von Wasser jedweder Art in den Hang
- biologische Pflege des Hangs
- keine Ablagerung von Garten- oder sonstigen Abfällen
- Rodung etc. nur in Absprache mit Fachleuten aus Forst und Ingenieurgeologie

9 Schlussbemerkung

Der vorliegende Bericht „Geo-Atlas Hangbewegungen“ stellt die geologisch-geotechnische Situation nach Abschluss unserer umfangreichen Untersuchungen und Recherchen der Jahre 2013 bis 2016 dar, in der auch Daten früherer Begutachtungen durch BBB oder anderer Bearbeiter eingearbeitet sind.

Das Ergebnis sind neben einer hochauflösenden Bestandserfassung präzise geologische Kartenwerke mit Differenzierung der verschiedenen Hangbewegungen und somit Gefährdungsbilder, gegliedert nach Intensitäten und Wahrscheinlichkeiten. Die betroffenen und gefährdeten Gebiete sind anhand Geländebefunden und Winkelmodellen ausgewiesen. Damit hat die Gemeinde ein sehr genaues Instrument zur Hand, um potentielle Gefährdungen durch Hangbewegungen zu erkennen und mögliche Risikoeinschätzungen vorzunehmen.

Darüber hinaus zeigen die Untersuchungsergebnisse aus unserer Sicht aber auch, dass Bedarf an geotechnischer Überwachung, Untersuchung und Sanierung besteht. Es haben sich bei der Bearbeitung drei Schwerpunktgebiete herauskristallisiert, für die wir detaillierte Maßnahmen für ein weiteres Vorgehen aufgezeigt haben. Weiterhin halten wir es für ratsam, den Geo-Atlas in regelmäßigen Abständen zu aktualisieren, um z.B. neue Bodenaufschlüsse und Erkenntnisse zu Schadensfällen etc. einzuarbeiten.

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



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



Markus Bauer
(Dipl.-Geol. TUM)