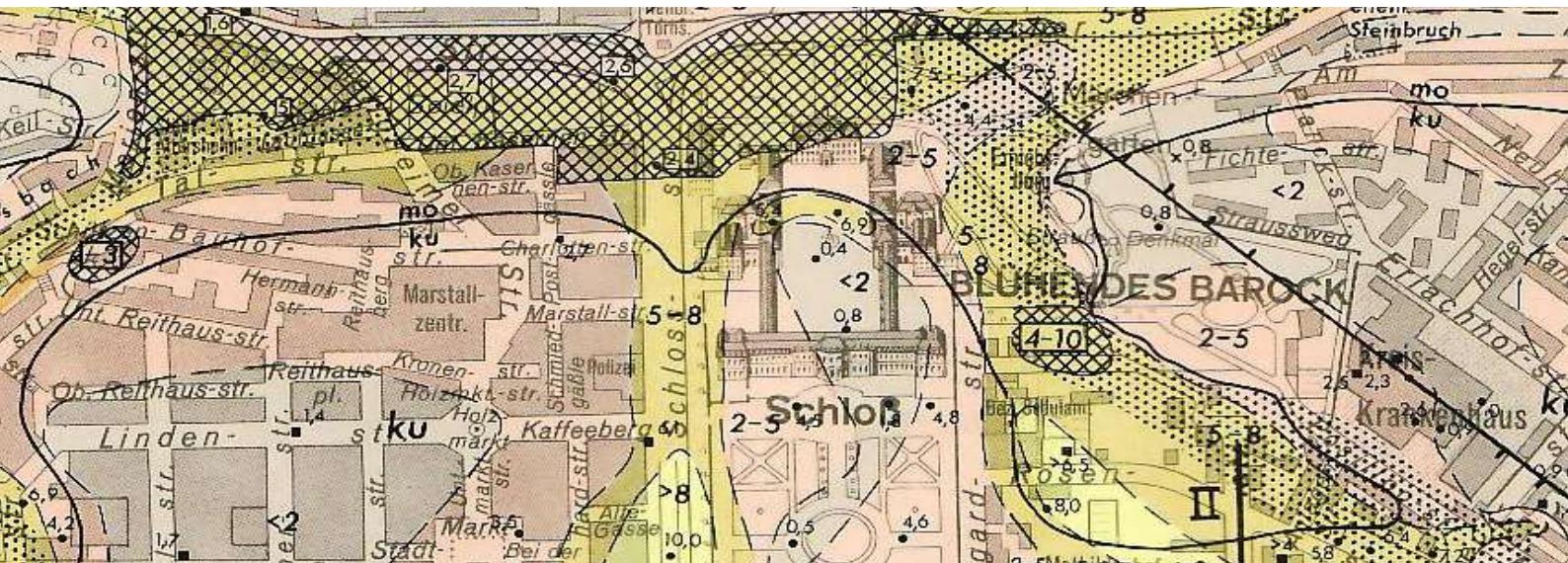




LUDWIGSBURG

Der Baugrund in Ludwigsburg



Der Baugrund in Ludwigsburg

3. Auflage

Stand: Februar 2026

Herausgeberin
Stadt Ludwigsburg
Fachbereich Tiefbau- und Grünflächen
Wilhelmstraße 11
71638 Ludwigsburg
c.fliegauf@ludwigsburg.de

Bearbeitung
Dr. Wolfgang Goos
Diplom-Geologe

mit Beiträgen aus
"Baugrund und Grundwasser in Ludwigsburg"
von Dr. Heinz Krause, LGRB-BW und Dr. Albrecht Wenninger, Stadt Ludwigsburg 1990.
Kartographie und Grundlage der Baugrundkarte:
Stadtmessungsamt Ludwigsburg, Dipl. Ing. Gernot Brück.

Geologische Daten und Beschreibungen gibt es in der Broschüre "Geologie in Ludwigsburg"
auf der Web-Seite der Stadt.

Das Titelbild zeigt das Barocksenschloss und den Bau der Faultürme auf der Kläranlage in
Ludwigsburg-Hoheneck vor dem Hintergrund der baugrundgeologischen Karte.
Luftbild-Ausschnitt Barocksenschloss: Wikipedia, "Luftbild des Residenzschlosses Ludwigsburg,
den Gartenanlagen und dem Schloss Favorite", Carsten Steger, Lizenz [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Inhalt

1. Vorwort und Einleitung	5
1.1 Eurocode, Europa- und DIN-Normen	5
1.2 Bauleitplanung	6
1.3 Baugrundrisiko	7
1.4 Geotechnische Kategorien	8
1.5 Geotechnischer Bericht	9
2. Geologischer und tektonischer Bau von Baden- Württemberg	12
2.1 Grundgebirge und Deckgebirge	15
2.2 Grundsichten und Decksichten	15
2.3 Mutterboden, Lockergesteine, Festgesteine, Bodenaushub, Bodenschutzkonzept	16
3. Die Eigenschaften des Baugrundes in Ludwigsburg	18
3.1 Grundsichten	18
3.1.1 Muschelkalk	18
3.1.2 Lettenkeuper	19
3.1.3 Gipskeuper	20
3.2 Decksichten	27
3.2.1 Löss und Lösslehm	27
3.2.2 Frostschutt, Fließerden, Hangschutt, Talschutt	29
3.2.3 Junge Talfüllungen, Abschwemmmassen, Talauen	29
3.2.4 Ablagerungen des Neckars	30
3.3 Schichtlagerung und Tektonik	33
3.4 Erdbebensicherheit	34
3.5 Hydrogeologische Verhältnisse	37
3.5.1 Grundwasserführung und Grundwasserstände	38
3.5.2 Wasserschutzgebiete, Grundwassernutzung	41
3.5.3 Chemismus und Verunreinigungen der Grundwässer	41
3.5.4 Erdwärmennutzung	41
3.6 Baugrundtechnische Risikoflächen	42
3.6.1 Allgemeine geologische und hydrogeologische Risikoflächen	42
3.6.2 Erdfälle und Lösungshohlräume	42
3.6.3 Steinschläge und Felsabbrüche	43
3.6.4 Schadstoffbelastungen in Böden, Bodenluft, Grundwasser und in der Bausubstanz. Entsorgung	43
3.6.5 Kriegsschäden, Kampfmittel, Luftschutzstollen, alte Kellerräume	45
4. Einführung in die Baugrundkunde	48
4.1 Festigkeit von Boden und Fels	48
4.1.1 Festgesteine	48
4.1.2 Veränderlich feste Gesteine	48
4.1.3 Lockergesteine	50
4.2 Boden- und gesteinsphysikalische Eigenschaften	50
4.2.1 Korngröße, Kornverteilung, Bodengruppen	50
4.2.1.1 Einteilung der Lockergesteine nach DIN 1054	53
4.2.2 Kalkgehalt	55
4.2.3 Wassergehalt	55
4.2.4 Dichte, Wichte, Auflockerung	56
4.2.5 Verdichtbarkeit, Lagerungsdichte, Proctorversuch	57
4.2.6 Konsistenz und Plastizität, Kornfraktionen	59
4.2.7 Verwitterung	59
4.2.8 Durchlässigkeit, kapillare Steighöhen	62
4.2.9 Verformungsverhalten, Setzungen und Scherfestigkeit	62
4.2.10 Sohldruck, Sohldruckwiderstand	63

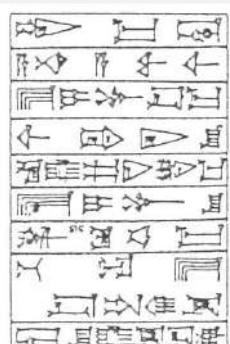
4.3	Gründung von Bauwerken	63
4.3.1	Flachgründung	64
4.3.2	Maßnahmen zur Verbesserung von wenig tragfähigem Untergrund	65
4.3.3	Tiefgründung, Pfahlgründung	66
4.4	Bauen am Hang, Baugrubensicherung	67
4.4.1	Hangsicherung, Baugrubensicherung	69
4.4.2	Verbauarten	70
4.5	Baugrund und Grundwasser, Frost- und Schrumpsicherheit	72
4.5.1	Bauen im Grundwasser, Wasserbeanspruchungsklassen	72
4.5.1.1	Abdichtung und Grundwasserumläufigkeit	75
4.5.2	Bauen außerhalb des Grundwassers	78
4.5.3	Frostempfindlichkeit, Bodenaustrocknung, Schrumpfen und Quellen	78
5.	Tabellen	80
	Tab. 1: Baugrundqualität im Raum Ludwigsburg	80
	Tab. 1a: Bodenarten und ihre Eigenschaften	81
	Tab. 2: Bodenmechanische Kenn- und Rechenwert	83
	Tab. 3: DIN 18300, Homogenbereiche, Boden- und Felsklassen	86
	Tab. 4: DIN 1045, Gründung auf Fels	91
	Tab. 5: DIN 1054, Zulässige Sohldrücke	92
	Tab. 6: Böschungsneigung bei Einschnitten in bindigen Böden	92
	Tab. 7: DIN 18196, Übersicht Bodenklassifikation	93
	Tab. 8: Auszug aus DIN 4023, Kurzzeichen und Farbkennzeichnungen für Bodenarten und Fels	94
6.	Beilagen und Bilder	97
7.	Literatur	147
8.	Baugrundgeologische Karte	153

Ausschluss der Gewährleistung - Alle Angaben und Daten sind ohne Gewähr.

Eine Baugrundkarte und die dazugehörenden Erläuterungen können nie vollständig sein. Die hier aufgeführten Daten und Beschreibungen dienen zur allgemeinen Orientierung und sind als interpolierte Einzel- und Momentaufnahmen zu verstehen. Bei konkreten Bauplanungen, Bauvorhaben und Entsorgungen und bei der Erschließung von Grundwasser und Erdwärmesonden vorab alle erforderlichen Genehmigungen einzuholen und es sind rechtzeitig qualifizierte Fachgutachter hinzuzuziehen, welche die für das Projekt relevanten Informationen entsprechend der einschlägigen Vorschriften und Normen und den vor Ort und bei Boden- und Grundwasseraufschlüssen gewonnenen Daten erheben, auswerten, darstellen und an das Projekt angepasst interpretieren. Baugrundnormen und Entsorgungsvorschriften unterliegen einer raschen Veränderung. Die hier publizierten Daten und Fakten, z.B. aus DIN/EN/ISO-Normen und aus anderen Regelwerken, dienen dem allgemeinen Verständnis ohne Garantie für die Aktualität, Vollständigkeit und Richtigkeit. Für konkrete Projekte sind die aktuell gültigen Originalquellen zu verwenden.

Im Altertum war die Sicherheit von Bauwerken auch schon von Bedeutung - "Codex Hammurabi"

Hammurabi (* 1792 v. Chr.; † 1750 v. Chr.), 6. König der ersten Dynastie von Babylon und König von Sumer und Akkad. Berühmt geworden wegen der ältesten, vollständig erhaltenen Rechtssammlung, den Codex Hammurabi. Aufgezeichnet unter anderem auf einer ca. 2,25 m hohen Stele aus Diorit, die 1902 bei Ausgrabungen in Susa gefunden wurde und die heute im Louvre in Paris ausgestellt ist.



§ 229 auf der Stele:

"Wenn ein Baumeister für jemanden ein Haus errichtet, dessen Konstruktion nicht fest genug ist, so dass das Haus einstürzt und den Tod des Bauherrn verursacht, so soll dieser Baumeister getötet werden."

Heute gilt der § 319 des Strafgesetzbuches:

(1) Wer bei der Planung, Leitung oder Ausführung eines Baues oder des Abbruchs eines Bauwerks gegen die allgemein anerkannten Regeln der Technik verstößt und dadurch Leib und Leben eines anderen Menschen gefährdet, wird mit Freiheitsstrafe bis zu 5 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

1. Vorwort und Einleitung

Im Jahre 1990 hat die Stadt Ludwigsburg zusammen mit dem Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau – LGRB (früher Geologisches Landesamt Baden-Württemberg) das Kartenwerk "**Baugrund und Grundwasser in Ludwigsburg**" mit Erläuterungen herausgegeben (H. Krause & A. Wenninger 1990). Auf der Basis der Erläuterung zum Baugrundkartenwerk von 1990 wurde 2005 ein neu gestalteter, aktualisierter und erweiterter Textteil zur Baugrundkarte erstellt. Im Jahr 2010 wurde diese Auflage mit neuen Daten und Grafiken überarbeitet und wird regelmäßig aktualisiert. Die baugrundgeologische Karte (Deckenschichtenkarte) ist als Anlage in Kap. 8 beigelegt. Die Gemarkung von Ludwigsburg ist auf 4 geologischen Karten des LGRB-BW im Maßstab 1 : 25 000 dargestellt. In Beilage 4 ist die geologische Karte von Ludwigsburg im Maßstab ca: 1 : 50000 enthalten. Auf der Web-Seite www.ludwigsburg.de können weitere Informationen zu Geologie, Baugrund, Grundwasser, Erdwärmesonden und Altlasten abgerufen werden.

Die **Baugrundgeologie (Ingenieurgeologie)** ist eine naturwissenschaftlich-technische Disziplin an der Schnittstelle von Geologie und Bauingenieurwesen. Die **Bodenmechanik** ist die Lehre von den Kräften und Verformungen im Boden und beschreibt den Boden und seine physikalischen Eigenschaften. Jede Bauleistung steht in Wechselwirkung mit dem Baugrund. Mit der Errichtung eines Bauwerkes wird der Gleichgewichtszustand des Bodens gestört. Durch die Belastung verformt sich der Untergrund je nach Art des Bodens und der Größe der Belastung, und es kommt zu einer Verdichtung und Setzung des Bodens. Die Setzungen treten je nach Bodenart mehr oder weniger stark und mehr oder weniger lange auf. Beim Ableiten von Lasten in den Boden breiten sich die Kräfte unter einem Druckverteilungswinkel von ca. 45° aus und nehmen mit der Tiefe zwiebelschalenartig ab. Dabei kommt es auch zu seitlichen Druckbeanspruchungen im Untergrund, was v.a. in bindigen Böden bei kleiner Fundamentbreite und Einbindtiefe ab einer kritischen Bruchlast zum schlagartigen seitlichen Ausweichen des Bodens und zum sogenannten Grundbruch führen kann. Bei Bauwerken in Hanglagen kann es bei bindigen und wasserführenden Bodenschichten oder bei ungünstiger Schichtlagerung im Felsgestein zu einer Gefährdung des Bauwerkes durch Rutschen und Gleiten kommen. Ein Bauvorhaben muss auch im vorgegebenen Kostenrahmen und ohne schädliche Einflüsse auf die unmittelbar tangierende Umgebung und auf schützenswerte Naturressourcen, wie z.B. das Grundwasser, sowie im Rahmen der geltenden Normen und Vorschriften errichtet werden.

Gibt es eine Pflicht zur Baugrunduntersuchung? Nein, aber...

Auszugsweises Zitat aus: Wissenschaftliche Dienste, Deutscher Bundestag, WD 7 - 3000 - 143/20 (18. Januar 2021)

"Kurzinformation - Das Baugrund- und Gründungsgutachten"

...Eine allgemeine gesetzliche Pflicht privaten Bauherrn zur Beauftragung beziehungsweise Vorlage eines Baugrund- und Gründungsgutachtens besteht nicht. ... Obwohl mithin nach dem vorstehend genannten keine unmittelbare Pflicht des Bauherrn zur Beauftragung beziehungsweise Vorlage eines Baugrund- und Gründungsgutachtens besteht, kann eine Beauftragung im Einzelfall dennoch angezeigt sein. Dies gilt nach der Rechtsprechung insbesondere in Fällen des § 909 BGB, d.h. bei potenziell auf das Nachbargrundstück ausstrahlenden Vertiefungen. ... Nähere Vorgaben zu spezifischen Pflichten aus Architekten- und Ingenieurverträgen enthält zudem § 650p Abs. 1 BGB. Demnach wird der Unternehmer durch einen Architekten- oder Ingenieurvertrag verpflichtet, diejenigen Leistungen zu erbringen, die nach dem jeweiligen Stand der Planung und Ausführung des Bauwerks oder der Außenanlage jeweils erforderlich sind, um die zwischen den Parteien vereinbarten Planungs- und Überwachungsziele zu erreichen. So können mithin insbesondere auch vom Bauherrn eingesetzte Dritte bei problematischen Bodenverhältnissen unter Haftungsgesichtspunkten faktisch dazu verpflichtet sein, zu einem Geotechnischen Bericht zu raten, beziehungsweise ein solches zu veranlassen (vgl. etwa Korbion unter Verweis auf OLG Zweibrücken). Letztlich kann sich die Notwendigkeit der Erstellung eines Baugrund- und Gründungsgutachtens für die öffentliche Hand auch aus vergaberechtlichen Gesichtspunkten ergeben (vgl. etwa Kapellmann m.w.N.). So sind nach § 7 Abs. 6 VOB/A bei der Vergabe von Bauleistungen die für die Ausführung der Leistung wesentlichen Verhältnisse der Baustelle, zum Beispiel Boden- und Wasserverhältnisse, so zu beschreiben, dass das sich bewerbende Unternehmen ihre Auswirkungen auf die bauliche Anlage und die Bauausführung hinreichend beurteilen kann. ..."

...aber:

Ist der Architekt / Planer nicht in der Lage, den Baugrund hinreichend zu beurteilen, muss er den Bauherrn unmissverständlich und nachweisbar auf die Notwendigkeit einer rechtzeitigen geotechnischen Untersuchung durch einen Sachverständigen für Geotechnik und ggf. vor den Geländearbeiten auf die Notwendigkeit eines qualifizierten Kampfmittelgutachtens hinweisen (DIN 4020 - 5.1, VOB-A, § 9 Ziffer 3 Abs. 3). Aus der Rechtsprechung geht hervor, dass ein Geotechnischer Bericht im Grunde zum Pflichtprogramm einer sachgerechten Planung gehört. Für weiterführende Lektüre sei auf das Urteil des OLG Naumburg vom 29.1.2014, Az. 12 U 149/13, hingewiesen. Der Gutachter tritt durch die Beauftragung in das Baugrundrisiko mit ein. Sollten sich Bauarbeiten auf ein Nachbargrundstück oder Bauwerk auswirken, kann sich nach § 909 BGB die Pflicht zu einem Baugrundgutachten ergeben.

1.1 Eurocode (EC), Europa- und DIN-Normen

Für die Baugrundgeologie und für die Altlastenerkundung gibt es zahlreiche Normen, Gesetze, Verordnungen und Vorschriften. Die nationalen Baugrundnormen wurden z.T. durch bisher 10 Eurocodes (EC) ersetzt. "DIN EN" bezeichnet eine europäische Norm, die in Deutschland als nationale Norm übernommen wurde.

Baugrunduntersuchungen und Bewertungen und die dazu notwendigen Bodenaufschlüsse müssen normgerecht und unter Beachtung der erforderlichen Genehmigungen (Wasserrechtsverfahren etc.) und der erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen (Kampfmittelkundung, Schutz vor Schadstoffen etc.) durchgeführt werden.

Auszüge aus Ingenieurgeologie, Kapitel 1.2 von H. Prinz & R. Strauß 2018:

"Die grundlegende europäische Geotechnik-Norm, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln, liegt in deutscher Fassung seit 2005 als DIN EN 1997-1 vor. Sie stellt eine Rahmennorm dar, in der z. B. drei Nachweisverfahren für die geotechnische Bemessung zur Wahl gestellt werden. Um die Euronorm in den Mitgliedstaaten praktisch anwendbar zu machen, werden in einem Nationalen Anhang (DIN EN 1997-1/NA) die in Deutschland anzuwendenden Nachweisverfahren und die zugehörigen Teilsicherheitswerte festgelegt. Dazu gehört auch die DIN 1054:2010 Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, in der spezielle deutsche Erfahrungen enthalten sind, z.B. die Tabellen für die Sohldruckspannung. Mit dem Eurocode 7 Teil 1 in Verbindung mit dem Nationalen Anhang DIN EN 1997-1/NA:2010 und der DIN 1054:2010 liegen jetzt für Bemessungsaufgaben in der Geotechnik drei Normen vor. Das Normenwerk Teil 2 des EC 7 „Erkundung und Untersuchung des Baugrundes“ besteht ebenfalls aus DIN EN 1997-2:2010, dem Nationalen Anhang DIN EN 1997-2/NA:2010 und der DIN 4020:2010 „Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2. Diese drei Normen regeln Planung, Durchführung und Auswertung von Baugrunduntersuchungen. Im Zuge einer Überarbeitung des EC 7 ist auch ein Teil 3 „Geotechnische Bauwerke“ (bisher in Teil 1) vorgesehen. Bei der derzeitigen Normungsaktivität ist es schwierig, mit dem Stand der Veröffentlichungen Schritt zu halten.“

Auswahl einiger Europa- und DIN-Normen, in denen geotechnische Grundlagen geregelt sind:

- DIN EN 1997-1 mit nationalem Anhang, Eurocode 7, "Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik",
- DIN EN 1997-2 mit nationalem Anhang, Eurocode 7, "Erkundung und Untersuchung des Baugrunds"
- DIN EN 1998-2010 - 2012 mit nationalem Anhang, EC8, "Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben"
- DIN EN ISO 22475-1, „Geotechnische Erkundung und Untersuchung“
- DIN 1054 Nationales Regelwerk "Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau" zu Eurocode 7. Ergänzende Regelungen zu DIN EN1997-1 und Änderung A
- DIN 4017 (2006-03) und DIN 4017 Beiblatt 1 (2006-11), Baugrund - Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen – Beiblatt 1: Berechnungsbeispiele
- DIN 4020 "Geotechnische Untersuchungen für baugrundtechnische Zwecke". Ergänzung zu DIN EN1997-2 + NA
- DIN 4049 "Hydrogeologie"
- DIN 4084 (2009-01) und DIN 4084 Beiblatt 1 (2012-07), "Baugrund" – Geländebruchberechnungen – Beiblatt 1
- DIN 4085 (2017-05) und DIN 4085 Beiblatt 1 (2011-12), "Baugrund" - Berechnung des Erddrucks – Beiblatt 1
- DIN EN ISO 14688-1/2 "Geotechnische Erkundung und Untersuchung von Boden"
- DIN EN ISO 14689 "Geotechnische Erkundung und Untersuchung von Fels"
- DIN 18196:2023-02 "Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke"
- DIN 18300:2015-08 "Allgemeine Technische Vertragsbedingung für Erdarbeiten im Rahmen der VOB Teil C" und DIN 18301, 18302, 18307
- DIN 18533:2017-07 "Abdichtung von Erdberührten Bauteilen" Teil 1, zusammen mit DIN 18195-2017
- Eurocode EC8: "Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben" und Nationaler Anhang, ersetzt DIN 4149-1

1.2 Bauleitplanung

Bei der Bauleitplanung obliegt einer Gemeinde die Pflicht, auf die ihr **bekannten** Baugrundrisiken hinzuweisen, die durch den Bauherrn/Planer **nicht oder nur mit einem ortuntypischen und unzumutbaren Aufwand** beherrschbar sind. Beispiele:

- Über ein ganzes Grundstück sehr feuchter und stauender Untergrund mit sehr flachem Grundwasserstand und starkem Grundwasserzufluss (Moor, Riedgebiet). Oft einhergehend mit flächig verbreitetem und tiefreichendem, wenig tragfähigem, weichem und organischem Untergrund (Anmoor, Torf), der auch bei kleinen Bauvorhaben eine aufwendige Gründung, z.B. umfangreicher Aushub, erheblicher Tiefgründung und Aussteifung etc. erforderlich macht.
- Bekannte größerer und flächige Rutschungen am Hang wegen ungünstiger geologischer und hydrologischer Verhältnisse.
- Bekannte größere Hohlräume durch Bergbau.
- Hat die Gemeinde Anhaltspunkten auf Schadstoffe im Boden (Industriegebiet, Deponie etc.) muss sie darauf hinweisen.

Es ist jedoch nicht die Aufgabe der Bauleitplanung, den Bauherrn/Planer auf **technisch gut beherrschbare und ortstypisch zumutbare Baugrundrisiken** hinzuweisen oder diese zu erkunden und technisch zu bearbeiten. Beispiele:

- Sickerwasser und Grundwasser im Bereich des Untergeschosses mit der Notwendigkeit einer dauerhaften Abdichtung, einer kostenpflichtigen Ableitung oder Versickerung, einer Sicherung gegen Auftrieb und mit den notwendigen Schutzmaßnahmen gegenüber den umgebenden Grundstücken, Bauwerken und Anlagen.
- Harte und schwer lösbare oder weiche Bodenschichten (Bodenklassen 1 - 3 und 6 - 7 nach der alten DIN 18300).
- Setzungen und Hebungen des Boden, wie sie aufgrund der vorhandenen geologischen Verhältnisse zu erwarten sind.
- Hohlräume und Klüfte, z.B. durch Auslaugungen im Gestein und Hohlräume durch den Bau von Keller und Luftschutzstollen. **Achtung!** Es ist allgemein bekannt und ortstypisch, dass die gesamte Gäufläche **Erdfallgebiet** ist. Bisher sind in Ludwigsburg mehrere Karststrukturen teils bekannt und teils digital kartiert worden. Diese sind auf der Ingenieurgeologischen Gefahren-hinweiskarte (IGHK50) im Kartenviewer des LGRB-BW verzeichnet. Die Erkundung und ggf. technische Bearbeitung von Erdfällen und von unterirdischen Stollen etc. ist Sache des Bauherrn und der von ihm beauftragten Fachleute.
- Boden-, Bodenluft- und Grundwasserverunreinigungen auf Grundstücken ehemaliger und aktueller Gewerbe- und Industriebetriebe, Verunreinigungen in der Substanz und Ausstattung von Bauwerken und Entsorgungsmehrkosten beim Baugruben-aushub wegen geogener Belastungen (Sulfat etc.), wegen erhöhter organischer Belastungen (Humus, Wurzeln etc.) oder wegen ungünstiger Verwertungsmöglichkeiten des Aushubs und der Abbruchsubstanz am Markt.
- In Siedlungsräumen, auf Verkehrswegen und auf Wiesen und Feldern gibt es künstliche Auffüllungen. Diese beinhalten oft leichte bis mittlere und manchmal auch höhere Schadstoffbelastungen, z.B. mit Teer und mit Mineralöl. Eine Kommune kann das nicht flächendeckend erkunden. Dieses Erkundungs- und Kostenrisiko trägt der Bauherr.
- Die Erkundung und Entsorgung von Kampfmitteln vor allen Eingriffen in den Untergrund ist Sache des Bauherrn.

Nach BauGB § 5 III Nr. 3 und § 9 V Nr. 1 und 3 "...sollen Flächen, bei deren Bebauung besondere bauliche Vorkehrungen gegen äußere Einwirkungen oder gegen Naturgewalten erforderlich sind, und Flächen, deren Böden erheblich mit umweltgefährdenden Stoffen belastet sind, im Flächennutzungs- und Bebauungsplan gekennzeichnet werden."

Das betrifft z.B. Hochwassergebiete in Tallagen und größere Boden-, Bodenluft- und Grundwasserverunreinigungen aus Gewerbe- und Industriebetrieben, Müllplätzen und Militäranlagen, soweit bekannt, nicht aber die natürlichen Grundwasserschwankungen. Die Erheblichkeitsschwelle bei Schadstoffen ist von den von der Belastung ausgehenden Gefahren (z.B. gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse) und von der geplanten Nutzung abhängig. Die Gemeinde erzeugt als Trägerin der Bauleitplanung mit der Ausweisung von Bauland das Vertrauen, dass die ausgewiesene Nutzung ohne Gefahr realisierbar, insbesondere der Boden nicht übermäßig mit Schadstoffen belastet ist. Hat die Gemeinde Anhaltspunkte für Bodenbelastungen und geht sie diesen nicht nach, kann das Schadensersatzansprüche gegen die Gemeinde als Trägerin der Bauleitplanung begründen. Die generelle geotechnische Eignung eines größeren Planungsgebiets kann durch eine **geotechnische Voruntersuchung** durch die planende Behörde (z.B. Erschließungsgutachten) eingeschätzt werden. Diese hat i.d.R. aber keine ausreichende Genauigkeit für einzelne Bauvorhaben. Auch eine Kennzeichnung nach BauGB schützt den Bauherrn nicht vor eigenen finanziellen Mehraufwendungen bei der Erkundung, Sanierung und allgemeinen Nutzbarmachung von Grundstücken. Es ist **Sache des Bauherrn**, Fragen der Vorgeschichte (Schadstoffe durch Gewerbe, Ablagerung und Kampfmittel etc.), der Beschaffenheit und der generellen Nutzbarkeit des Baugrunds, der Grundwasser- und Hochwassersituation und der Entsorgung des möglicherweise kontaminierten Bauwerksabbruchs und des Bodenaushubs auf eigene Kosten zu klären und die erforderlichen Mehraufwendungen zur Nutzbarmachung zu tragen (BWK 2003).

Altlasten, Schadstoffe (Beilage 15, Kap. 3.6.4)

Gemäß § 5 III Nr. 3 und § 9 V Nr. 1 und 3 BauGB sollen Flächen, deren Böden erheblich mit umweltgefährdenden Stoffen belastet sind, im Flächennutzungs- und Bebauungsplan gekennzeichnet werden. Die juristischen Fragen zu Altlasten (Schadstoffe in Boden, Bodenluft, Grundwasser und Bausubstanz) in der Bauleitplanung sind komplex und können hier nicht umfassend dargestellt werden. Eine Kommune muss auch bei Verdacht die ihr bekannten Fakten und Gefahren zu einem Grundstück bei der Bauleitplanung offenlegen. Dabei sind bei Privatgrundstücken aber datenschutzrechtliche Belange zu berücksichtigen. **Ein Bau- und Kaufinteressent sollte frühzeitig und am besten vor dem Kauf alle relevanten Daten zu einem Grundstück und Bauwerk im Rahmen eines Baugrund- und Grundwassergutachtens und eines Altlastengutachtes (Schadstoffe im Boden, im Grundwasser und ggf. in der alten Bausubstanz) untersucht lassen.**

Das Thema ist fachlich wie juristisch komplex und muss ggf. einzelfallbezogen bearbeitet werden.

1.3 Baugrundrisiko

Der natürlich gewachsene, dreidimensionale und nicht selten inhomogene Baugrund oder eine Auffüllung könnten nur durch sehr enggerastete geotechnische Untersuchungen so umfassend erkundet werden, dass die Unsicherheiten bezüglich ihrer räumlichen Variabilität, Zusammensetzung und geotechnischen Eigenschaften nahezu ausgeräumt wären. Das würde aber hohe Kosten verursachen. Ein geeignetes Untersuchungsraster nach DIN EN 1997-2 Anhang B.3 macht eine schnelle und wirtschaftliche Untersuchung möglich, es verbleibt aber ein **unvermeidbares Baugrundrisiko**. Sollten schnell wechselnde Untergrundverhältnisse bekannt sein oder angetroffen werden, ist ein engeres Untersuchungsraster zu verwenden. Nach DIN 4020 sind Aufschlüsse in Boden und im Fels als interpolierbare Stichproben zu bewerten. Der Baugrund ist Bestandteil der Baukonstruktion, hat den Charakter eines naturgegebenen (Überraschungs)-Baustoffs und wird vom Bauherrn "geliefert". **Das grundsätzliche Risiko** für die Bebaubarkeit und für die baugrundtechnischen Eigenschaften eines Grundstücks trägt der Bauherr (§ 1 Abs. 1.2, § 4 Abs. 3 sowie § 13 Abs. 3 VOB/B und BGB §§ 644, 645, 242, 313).

Aus Wikipedia – Baugrundrisiko

"Eine Vielzahl von Baugrundkundungs- und -beschreibungsnormen regelt die sach- und fachgerechte Feststellung, mit welchen Boden- und Wasserverhältnissen zu rechnen ist. Diese sind in den Abschnitten 2 aller ATV DIN 18300 bis 18326 der VOB Teil C detailliert aufgeführt. Auch die Generalnorm der VOB Teil C, die ATV DIN 18299, beinhaltet wesentliche Ausschreibungsvorgaben zum Baugrund und zur Hydrogeologie. Nach DIN 18299 muss der Architekt in der Leistungsbeschreibung insbesondere die „Bodenverhältnisse, den Baugrund und seine Tragfähigkeit sowie Ergebnisse von Bodenuntersuchungen“ angeben". ... "Von besonderer Bedeutung für die Lösung von Streitfällen im Zusammenhang mit dem Baugrund samt Grundwasser und Kontaminationen ist die VOB Teil C. Diese muss von öffentlichen Auftraggebern zur Vertragsgrundlage gemacht werden (§ 8 [VOB/A](#)). In allen Tiefbau-regelungen der ATV DIN 18300 mit 18325 finden sich entsprechende ausgewogene Regelungen".

Das echte (unvermeidbare) Baugrundrisiko (Systemrisiko) ist nach DIN 4020:2010-12 als Ergänzungsnorm zur DIN EN 1997-2, Abschnitt "zu A 1.5.3.2017" "...ein in der Natur der Sache liegendes, unvermeidbares Restrisiko, das bei Inanspruchnahme des Baugrundes zu unvorhersehbaren Wirkungen bzw. Erschwernissen, z.B. Bauschäden oder Bauverzögerungen führen kann, obwohl derjenige, der den Werkstoff Baugrund zur Verfügung stellt, seiner Verpflichtung zur Untersuchung und Beschreibung der Baugrund- und Grundwasserverhältnisse nach den Regeln der Technik zuvor vollständig nachgekommen ist und obwohl der Bauausführende seiner eigenen Prüfungs- und Hinweispflicht Genüge getan hat."

Dieses Risiko trägt allein der Bauherr, z.B. wenn zwischen Aufschlusspunkten trotz eines DIN-gerechten Untersuchungsrasters unvorhersehbar ein anderer Baugrund angetroffen wird. Der Architekt/Fachplaner hat die Pflicht, den Bauherrn auf die Notwendigkeit einer Baugrundbegutachtung als Grundlage einer sachgerechten Planung/Statik hinzuweisen.

Beim **erweiterten (allgemeinen, vermeidbaren) Baugrundrisiko** sind die Erschwernisse auf ein Verschulden oder auf eine Pflichtverletzung eines Beteiligten (Auftraggeber oder Auftragnehmer) zurückzuführen, der dann auch die Folgen zu tragen hat. Z.B. Fehler bei der Begutachtung, beim Verbau, Mehrkosten wegen Aufweichung der Baugrubensohle durch unsachgemäßen Baubetrieb, Fehler bei der Ausschreibung etc.. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang auch **§ 909 BGB:** "Ein Grundstück darf nicht in der Weise vertieft werden, dass der Boden des Nachbargrundstücks die erforderliche Stütze verliert, es sei denn, dass für eine genügende anderweitige Befestigung gesorgt ist." Bei **unvorhersehbaren Schäden an Nachbargrundstücken oder Gebäuden haftet der Bauherr voll umfänglich für alle Schäden. Das gilt auch für Erdwärmesohlen** (analoge Anwendung von § 906 BGB). Bei **Abstützungen oder Unterfangungen von Nachbargebäuden** (DIN 4123) lassen sich aber geringe Setzungen bis 5 mm und Haarrisse bis 0,2 mm oft nicht vermeiden. Je nach der Bodenbeschaffenheit können auch baubedingte **Erschütterungen**, z.B. durch Rammen, die Nachbarbauwerke beeinträchtigen (DIN 4150). Eine Beweissicherung, Überwachung und die Kalkulation von eventuellen Reparaturkosten sind hier zu empfehlen. Der Bauunternehmer muss als Auftragnehmer den Baugrund und seine Tragfähigkeit sowie Schadstoffe und Grundwasserverhältnisse und die Einflüsse benachbarter Gewässer und Gebäude auf das Bauwerk und die Bauausführung hinreichend beurteilen und sein Angebot fachgerecht gestalten können. In **§ 9 Nr. 1, 2, 3 VOB/A** steht: "Die Leistungen sind eindeutig und so erschöpfend zu beschreiben, dass alle Bewerber die Beurteilung im gleichen Sinne verstehen müssen und ihre Preise sicher und ohne umfangreiche Vorarbeiten berechnen können. Den Auftragnehmer darf kein ungewöhnliches Wagnis aufgebürdet werden für Umstände und Ereignisse, auf die er keinen Einfluss hat und deren Entwicklung auf die Preise und Fristen er nicht im Voraus schätzen kann. Die Verhältnisse auf der Baustelle (Baugrund, Grundwasser, Schadstoffe etc.) sind so zu beschreiben, dass der Bewerber und Auftragnehmer ihre Auswirkungen auf die baulichen Anlagen und auf die Nachbarschaft hinreichend beurteilen kann." Der Bieter hat aber im Hinblick auf die Güte des Baugrunds eine **Prüf- und Hinweispflicht** (siehe Kapitel 1.5). Er hat die Ausschreibungsunterlagen auf versteckte Risiken und auf ungenaue oder fehlenden Beschreibungen der Boden- und der Grundwasserverhältnisse und der Schadstoffe im Boden, im Grundwasser und in bestehenden Bauwerken zu prüfen. Liegt kein geotechnischer Bericht vor, muss der Auftragnehmer diesen anfordern, um ein umfassendes und fachgerechtes Angebot abgeben zu können. Tut er das nicht, bleibt er später auf möglichen Mehrkosten, wie z.B. wegen Entsorgung von Schadstoffen im Boden oder Gründungsmehrkosten etc., sitzen (BGH, 22.12.2011). **VOB/B § 4 Abs. 3:** "Hat der Auftragnehmer Bedenken..., gegen die Güte der vom Auftragnehmer gelieferten Stoffe... [der Baugrund wird vom Bauherrn geliefert], so hat er sie dem Auftragnehmer unverzüglich... schriftlich mitzuteilen...".

1.4 Geotechnische Kategorien (GK 1, 2, 3)

Die Einstufung in Geotechnische Kategorien nach DIN EN 1997-1 (Eurocode EC 7) bzw. DIN 4020 und DIN 1054 ist vor Beginn der geotechnischen Untersuchung durch einen Sachverständigen vorzunehmen und mit fortschreitendem Kenntnisstand anzupassen. Bei Bauprojekten mit GK 1 reicht ein Geotechnischer Bericht, bei GK 2 und GK 3 muss ein Sachverständiger für Geotechnik mit direkten Aufschlüssen nach DIN EN ISO 22475-1:2022-02 den Baugrund begutachten. Maßgebend für die Einstufung ist jenes Kriterium, das die höchste Geotechnische Kategorie ergibt.

Die folgenden Beschreibungen zu den Geotechnischen Kategorien sind vereinfachte Beispiele zur Orientierung!

Die vollständigen und verbindlichen Definitionen sind bei der Anwendung unbedingt in den einschlägigen Vorschriften und Normen nachzusehen. Rammkernbohrungen(-sondierungen) mit 30 - 80 mm Außendurchmesser (DIN EN ISO 22475-1) gelten als direktes Aufschlussverfahren und kommen bei GK 2 oft zur Anwendung (Zulässigkeit?). Bei GK 3 sind sie aber nur als Ergänzung zu Kernbohrungen und Schürfen in Lockergesteinen zugelassen, denn die Eignung der Proben für Untersuchungen (Kategorie B oder C, Gütekasse 3 - 5) ist bei Rammkernbohrungen begrenzt. Bei GK 2 und GK 3 - Bauwerken müssen die zulässigen Untersuchungsabstände - tiefen an die Komplexität angepasst werden, der geotechnische Bericht muss zusätzlich auch eine Gründungsempfehlung sowie Folgerungen für das Bauwerk und für die Ausführung enthalten und die Baugrunduntersuchungen sollte in Etappen durchgeführt werden (DIN EN 1997-2).

GK 1 (geringer Schwierigkeitsgrad) umfasst kleine, einfache Bauwerke mit geringen Lasten auf waagerechtem oder schwach geneigtem Gelände (KA5-N2.1, < 9 %) und bei einfachen und überschaubaren Baugrundverhältnissen, die nach gesicherter örtlicher Erfahrung als tragfähig und setzungsarm bekannt sind. Die Voraussetzungen für den vereinfachten Tragfähigkeitsnachweis gemäß DIN 1054, A6.10 A (1) müssen erfüllt sein. Die Standsicherheit kann aufgrund gesicherter Erfahrung und einfacher Erkundungen beurteilt werden. Weder die Umgebung noch das Grundwasser werden tangiert oder beeinflusst, das Grundwasser steht $\geq 0,5$ m unter der Gründungsohle oder ein Grundwasserkontakt ist "nach einer vergleichbaren örtlichen Erfahrung" (DIN EN 1997-1) unbedenklich. Es sind keine schädlichen oder erschwerenden äußeren Einflüsse zu erwarten (Hohlräume, Auslaugungen etc.). Es handelt sich um setzungsunempfindliche und flach gegründete Bauwerke mit Stützenlasten bis 250 kN und Streifenlasten bis 100 kN/m, mit Stützbauwerken, Baugruben und Gräben ≤ 2 m Tiefe, z.B. kleine Einfamilienhäuser, eingeschossige Hallen, Garagen. Es handelt sich um Bauwerke, bei denen nach DIN EN 1998-5/NA (EC8) im Hinblick auf die Erdbebenbelastung kein Nachweis der Standsicherheit erforderlich ist. Nachbarbauwerke, Verkehrswege und Leitungen etc. werden durch das Bauwerk oder durch die Bauarbeiten nicht in ihrer Standfestigkeit oder Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigt. Die Gründungsohle sollte durch einen Sachverständigen überprüft werden, etc.

GK 2 (durchschnittlicher Schwierigkeitsgrad) umfasst gewöhnliche Bauwerke und Baugrundverhältnisse, bei denen der Baugrund nach den Regeln des Normenwerkes von einem Sachverständigen für Geotechnik durch direkte Aufschlüsse zu beurteilen und in einem Geotechnischen Bericht darzustellen ist. Die Untersuchungsabstände und -tiefen müssen an die

Komplexität angepasst werden. Schräg geschichtete oder auslaufende Bodenschichten sind möglich, nicht aber regellose oder sehr wechselhafte Bodenschichten. Die Böden dürfen nicht übermäßig empfindlich auf Belastungen reagieren (Seetone, Torf etc.). Es dürfen keine ungesicherten Hohlräume im Einflussbereich sein. Es sind direkte Aufschlüsse erforderlich. Die freie Grundwasseroberfläche kann höher als die Baugrundsohle liegen, die Absenkung muss aber mit den üblichen Maßnahmen beherrschbar sein und darf keine nachteiligen Auswirkungen auf benachbarte Bauwerke und Grundstücke haben. Baugruben mit Grundwasser und ab 2 - 5 m Tiefe können unter bestimmten Umständen noch GK 2 sein (z.B. einfacher Nachweis des hydraulischen Grundbruchs). Baugruben und Stützbauwerke können 10 m, Leitungsgräben können 5 m tief sein. Unterschiedliche Verformungen können vom Tragwerk aufgenommen werden. Stützenlasten über 250 kN und Streifenlasten über 100 kN/m, sowie Bauwerke der Bedeutungskategorien I und II nach DIN EN 1998-5/NA, bei denen eine Erdbebenbelastung beim Standsicherheitsnachweis berücksichtigt werden muss, gehören zu GK 2 oder 3. Gründungen neben bestehenden Gebäuden (Unterfangung, Abstützung) können GK 2 oder 3 sein. Pfahlgründungen können bei Einhaltung bestimmter Anforderungen GK 2 sein. Erforderlich sind eine ingenieurmäßige Bearbeitung und ein rechnerischer Nachweis der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit nach den einschlägigen Berechnungsnormen, etc..

GK 3 (hoher Schwierigkeitsgrad) umfasst Bauwerke und/oder Baugrund überdurchschnittlicher Schwierigkeiten, deren geotechnische Bearbeitung (Baugrunduntersuchung, geotechnischer Bericht und Standsicherheitsnachweise) nach DIN 1054, DIN 4020 vertiefte Kenntnisse und Erfahrungen auf dem jeweiligen Spezialgebiet der Geotechnik erfordern. Es sind direkte Aufschlüsse durch Kernbohren und Schürfen und eine versuchstechnische Ermittlung der Baugrundkenngroßen erforderlich. Die Untersuchungsabstände und -tiefen müssen an die Komplexität angepasst werden. Beispiele sind: regellose geologische Schichtung, geologisch wechselhaften Formationen, Böden unterschiedlicher Steifigkeitsverhältnisse, Böden mit hoher Verformungsempfindlichkeit, strukturempfindliche Böden, Böden mit einem ausgeprägtes Kriech-, Fließ-, Quell- oder Schrumpfverhalten, Rutschgefahr, veränderlich fester Fels, problematische Trennflächen, Senkungen und Hohlräume, problematische, z.B. stark wechselnde, gespannte, mehrschichtige oder temporär oder dauerhaft veränderte Grundwasser-Verhältnisse, Grundwasserabsenkung mit Gefahren für Nachbarbauwerke, Grundstücke und Quellen, Bauwerke, die einer hohen Wassersäule ausgesetzt sind (> 5m), Bauwerke der Bedeutungskategorie III und IV (Erdbeben), Bauwerke mit setzungsempfindlichem Tragwerk, hohen Lasten, hohe Lasten über Flachgründungen, große und stark beanspruchte Maschinenfundamente, komplexere Tiefgründungen, verpresste Pfahlsysteme, Mischgründungen (Flach-/Tiefgründung und Pfahl-/Plattengründung), Pfahlgründungen mit besonderer Beanspruchung, Bauwerke mit Daueranker, Gründungen neben bestehenden Gebäuden (wenn DIN 4123 nicht zutrifft), Dämme und Deiche auf schwierigem Untergrund oder bei hohem Wasserdruck, tiefe Baugruben, Böschungen mit über 10 m Höhe, Deponien für Schadstoffe, weitgespannte Brücken, Schleusen und Siele, Hohlraumbauten in Lockergesteinen oder klüftigem Fels, hohe Türme, Offshore-Bauten, Bauwerke mit einem hohen Sicherheitsanspruch, Verfahren des Spezialtiefbaus. Erdfallgebiete können als GK 2 oder 3 eingestuft werden. Unterfangungen in mindestens mitteldichten nichtbindigen und in mindestens steif-bindigen Böden sind je nach Schwierigkeitsgrad GK 2 oder GK 3. "Bauen am Hang" kann je nach den Verhältnissen (Hangneigung etc.) GK 1, GK 2 oder GK 3 sein.

1.5 Geotechnischer Bericht, Baugrund- und Gründungsgutachten, Bodengutachten

(DIN EN 1997-1 + 2 EC7, DIN EN 1997-2/NA:2010, DIN 4020:2010, DIN EN ISO 22475, DIN 1054:2001 etc.)

Geotechnische Berichte werden auf Grundlage der **EN 1997-2 – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds sowie zusätzlich in Deutschland nach DIN 4020 – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2 erstellt**. Sie sind letztlich Bestandteil des Geotechnischen Entwurfsberichts nach EN 1997-1 in Verbindung mit DIN 1054 Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Nach **DIN 4020:2010-12 "Geotechnische Untersuchungen für baugrundtechnische Zwecke"** und **DIN 1054:2010 "Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau"** muss ab der Geotechnischen Kategorie 2 eine geotechnische Begutachtung des Baugrunds in Form eines Berichts erfolgen. Die Erkundung muss normgerecht nach DIN EN ISO 22475-1 durch Schürfgruben, Bohrungen und DIN-gerechte Rammkernbohrungen erfolgen. Das Baugrund- und Gründungsgutachten ist ein Werkvertrag nach §§ 633 ff BGB. Vom Gutachter wird ein konkreter und mangelfreier Erfolg geschuldet. Der Geotechnische Gutachter (Sachverständiger für Geotechnik) hat die Aufgabe, den Architekten und Tragwerksplaner bei der Wahl der Bauhilfs- und Gründungsmaßnahmen zu beraten. Die Gutachten sind innerhalb des sogenannten **Erkundungsbereichs** durchzuführen, der vom Baugrundgutachter anhand der vorliegenden Planungen und der Gegebenheiten im und um das Baufeld festgelegt wird. Im Erkundungsbereich müssen alle relevanten Eigenschaften bekannt sein um die Wechselwirkung zwischen Baugrund, Bauwerk und Nachbarschaft zu erfassen und soweit wie möglich im Voraus zu berechnen. Baugrundgutachten, im Folgenden "Geotechnischer Bericht" genannt, sind aber immer nur "**begrenzt nachvollziehbare Wahrscheinlichkeitsaussagen**". Zwischen einzelnen Untersuchungspunkten können die interpolierten Boden- und Grundwasser-Verhältnisse auch sehr unterschiedlich sein. **Es verbleibt ein "echtes Baugrundrisiko" beim Bauherrn.** Der Architekt ist verantwortlich für die korrekte Interpretation und Umsetzung der geotechnischen Ergebnisse und Empfehlungen. Der Auftraggeber trägt das Risiko, dass die Bodenverhältnisse korrekt beschrieben werden, der Auftragnehmer hingegen die hat die Verpflichtung, die Beschreibung im Rahmen des Möglichen und Zumutbaren auf Plausibilität zu prüfen und die Übereinstimmung im Vergleich zum Gutachten zu überwachen (Baugrund - Soll vs. Baugrund -Ist). Nach DIN EN 1997-1 und -2 ist während der Bauausführung zu überprüfen, ob die Baugrundverhältnisse den Annahmen entsprechen. Ein Rohbauunternehmer ist auch verpflichtet, die vom Erdbauunternehmer vorgenommene **Verdichtung der Sohle** zu überprüfen (OLG Bremen). Er muss die Lasten und Fundamente so dimensionieren, dass z.B. die Setzungen gleichmäßig und in einer Größenordnung erfolgen, dass kein Schaden für das Bauwerk

entsteht, dass das Untergeschoß frei von Wassereintritt und übermäßiger Feuchtigkeit bleibt, und dass das Bauwerk entsprechend seiner Bestimmung dauerhaft genutzt werden kann. Nach einem Urteil des Oberlandesgerichts Frankfurt vom 07.12.2007, Az.: 22 U 135/07 muss bei einer Bauplanung in problematischen Gebieten der örtliche **Grundwasserstand** soweit möglich über mindestens 30 Jahre oder mehr recherchiert werden. Geotechnische Untersuchungen sind so zu planen, dass die wesentlichen geotechnischen Informationen und Kennwerte in den verschiedenen Projektphasen zur Verfügung stehen. Wenn möglich, sollte ein Baugruben- und Altlastengutachten vor dem Erwerb eines Grundstücks oder einer Immobilie durchgeführt werden.

Der Baugrubengutachter liefert mit seinem Gutachten eine normgerechte und sachverständige Beschreibung...

- zum Schichtaufbau und zur Schichtlagerung,
- zur Boden- und Felsart,
- zu den geotechnischen Kategorien,
- zu den Bodenkenn- und Rechenwerten (Homogenbereiche etc.)
- zum Verhalten und zur Tragfähigkeit des Bodens,
- zur Gründung und zur Standsicherheit,
- zur Baugrubensicherung
- zu den Grundwasserverhältnissen,
- zur Abdichtung gegen Wassereinbruch Feuchtigkeit,
- zur Vermeidung von Auftrieb (Bemessungswasserstand),
- zur Wasserhaltung während der Bauzeit,
- zu genehmigungsfähigen Drainagen,
- zur Abdichtung des UG gegen gasförmige Schadstoffe (LHKW, Radon etc.)
- zu unterirdischen Anlagen und Leitungen,
- zu Bauhindernissen aller Art,
- zur Arbeitsrauverfüllung und zu Fahr- und Gehwegen auf dem Grundstück
- zur Erdbebengefährdung,
- zu geotechnischen Gefahren (z.B. Karte des LGRB-BW),
- zu Boden-, Bodenluft- und Grundwasserverunreinigungen,
- zu Verunreinigungen in der vorhandenen Bausubstanz,
- zur Sanierung, Verwertung und Entsorgung der Verunreinigungen,
- zur Verwertung und Entsorgung des Baugrubenaushubs,
- zum Einfluss auf die und zum Schutz der Nachbarbauwerke und Grundstücke (z.B. Grundwasser, Sickerwasser),
- zur Versickerung und Retention von Oberflächen- und Dachwasser,
- zur Erkundung und Freimessung von Kampfmitteln im Boden (externer Fachgutachter),
- zu eventuellen Schutzgebieten,
- etc.

Bauwerke dürfen in keinem Fall...

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • umkippen • versinken • weggleiten • abrutschen • auftreiben • sich zu sehr setzen | <ul style="list-style-type: none"> • sich schief stellen • Frostschäden erleiden • Quell- und Schrumpfschäden erleiden • Wassereinbrüche haben oder nasse Stellen aufweisen • andere Bauwerke und Grundstücke beeinträchtigen, z.B. durch Setzung oder durch Grundwasserabsenkung/-aufstau. |
|--|--|

Baugrubengutachter, Sachverständiger für Geotechnik

Die Berufsbezeichnung "Sachverständiger" ist in Deutschland weder rechtlich geschützt, noch in Rechtsnormen präzisiert.

Die Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGfG e.V.), Fachsektion „Erd- und Grundbau“, Arbeitskreis AK 2.11 hat am 20.06.2016 die Empfehlung "Fachliche Voraussetzungen für Sachverständige für Geotechnik, Anforderungen an Sachkunde und Erfahrung (EASV)" herausgegeben.

Auszüge

"Vorliegende Empfehlung EASV beschreibt die Anforderungen, die an Sachverständige für Geotechnik nach DIN 4020: 2010-12 hinsichtlich Sachkunde und beruflicher Erfahrung zu stellen sind. Sie schließt damit eine Lücke, da bislang die im Sinne der DIN EN 1997, DIN 1054 und DIN 4020 tätigen Personen ohne Nachweis ihrer Sachkunde und beruflichen Erfahrung Geotechnische Berichte erstellen und entsprechende Fachplanungen ausführen können. ..."

Der Sachverständige für Geotechnik verfügt aufgrund einer fundierten Ingenieur- bzw. ingenieurgeologischen Ausbildung und langjähriger Erfahrung auf Ihren Fachgebieten über eine besondere Expertise auf den einschlägigen Gebieten der Geotechnik. Neben den Gebieten des Ingenieur- und Hochbaus handelt es sich beispielsweise um die Fachgebiete Tunnel- und Felsbau, Verkehrswegebau, Wasser- und Erdbau, Deponie- und Tagebau sowie um geothermische Fragestellungen.

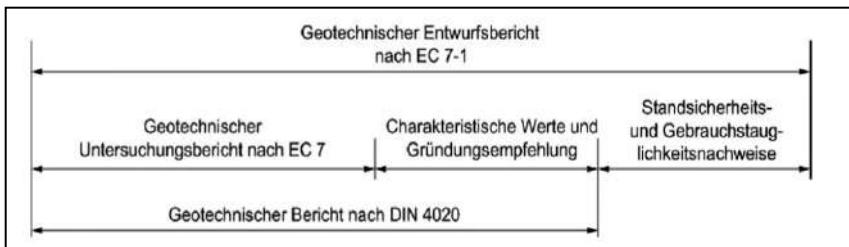
DIN 4020:2010-12, A1.5.3.24 definiert den Sachverständigen für Geotechnik als einen „Sonderfachmann oder Fachplaner mit Sachkunde und Erfahrung auf dem Gebiet der Geotechnik“. Die übergeordnete Euronorm DIN EN 1997-2: 2010-10, 1.3 (2) spricht allgemein von „angemessen qualifiziertem Personal“.

Laut DIN 4020:2010-12 unterstützt der Sachverständige für Geotechnik die Planung von Bauwerken und Bauteilen im Erd- und Grundbau, weist deren Standsicherheit nach und plant für ein Bauvorhaben die erforderlichen geotechnischen Untersuchungen und Messungen. Er überwacht die fachgerechte Ausführung der Aufschlüsse sowie der Feld- und Laborversuche. Aus dem Untersuchungsbefund zieht er Folgerungen für Planung und Ausführung. Dabei sind die Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Baugrund sowie die Auswirkungen des Bauvorhabens auf die Umgebung zu beachten. ...

Der Sachverständige für Geotechnik erstellt den Geotechnischen Untersuchungsbericht nach DIN EN 1997-2 Abschnitt 6 und den Geotechnischen Bericht 1 nach DIN 4020 A7 in einer für den Entwurfsverfasser und für Fachplaner benachbarter Fachgebiete unmissverständlichen Form. Ferner erstellt er für die geotechnischen Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise den Geotechnischen Entwurfsbericht nach DIN EN 1997-1. ...

Weitere Ausführungen, z.B. zum "Vereidigten Sachverständigen", sind u.a. dieser Empfehlung zu entnehmen:

https://www.dggt.de/images/PDF-Dokumente/Arbeitskreise/ak_2-11_empfehlung_2016.pdf



Übersicht zu Formen der geotechnischen Berichterstattung
(Quelle: DIN 4020:2010-12)

Zulässige Abstände der Untersuchungspunkte (DIN EN 1997-2 Anhang B.3)

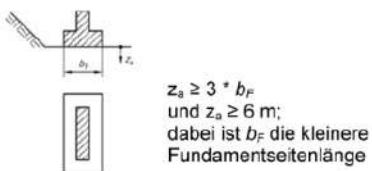
- Hoch- und Industriebauten: Rasterabstand 15 – 40 m.
- Großflächige Bauwerke (Deponien): Rasterabstand ≤ 60 m.
- Linienbauwerke (Verkehrswegen Leitungen, Tunnel): Abstand 20 m – 200 m
- Sonderbauwerke (Brücken, Schornsteine, Maschinenfundamente): 2 – 6 Aufschlüsse je Fundament
- Staudämme und Wehre: Abstände 25 – 75 m in maßgebenden Schnitten.

Normgerechte Erkundung durch Schürfgruben, Bohrungen und geeignete Rammkernbohrungen nach DIN EN ISO 22475-1.

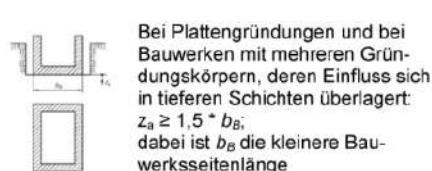
Bei einem Einfamilienhaus sind mindestens 4 Untersuchungspunkte zu empfehlen. Bei unklaren und schwierigen Baugrund- und Grundwasserbedingungen oder zur Eingrenzung von Unregelmäßigkeiten sind engere Abstände, mehr Untersuchungspunkte, angepasste bodenmechanische Laboruntersuchungen und ggf. die Einrichtung und Beobachtung von Grundwassermessstellen erforderlich. Das liegt im fachlichen Ermessen und in der Verantwortung des Gutachters.

Mindestuntersuchungstiefen (DIN EN 1997-2 Anhang B.3, DIN 4020:2010-12)

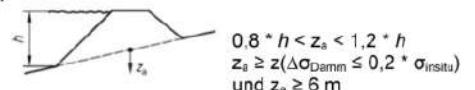
a) Fundament



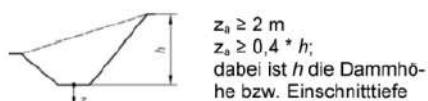
b) Bauwerk



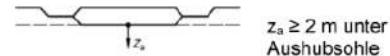
c) Damm



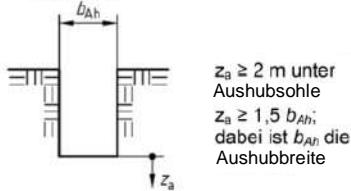
d) Einschnitt



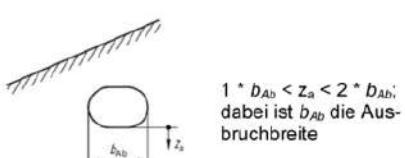
e) Landverkehrsbau



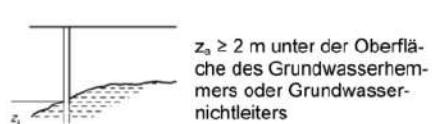
f) Kanal



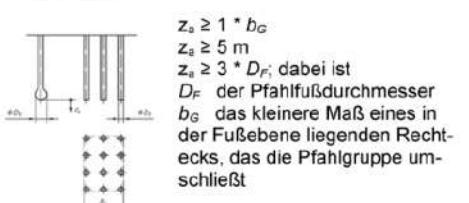
g) Tunnel und Kavernen



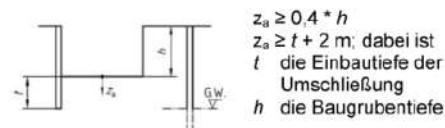
h) Dichtungswand



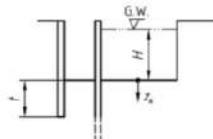
i) Pfähle



j) Grundwasserspiegel unterhalb der Baugrubensohle



k) Grundwasserspiegel oberhalb der Baugrubensohle



Das genaue Prozedere, der Untersuchungsumfang und die Sicherheitsnachweise für geotechnische Gutachten sind in DIN 4020 (Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke) in Verbindung mit Eurocode 7 (DIN EN 1997-2) beschrieben. Bei größeren Projekten und/oder bei komplexen Verhältnissen ist in mehreren Phasen zu erkunden und zu begleiten. Bei den Geotechnischen Kategorien GK 2 und GK 3 muss der Geotechnische Bericht zusätzlich auch eine Gründungsempfehlung sowie Folgerungen für das Bauwerk und für die Ausführung enthalten. Es sind charakteristische Werte der bodenmechanischen Kenngrößen und Grundwasserstände im Hinblick auf die geplanten Baumaßnahmen anzugeben. Gegebenenfalls sind Angaben zur **Baugrubensicherung**, zur **temporären Grundwasserabsenkung (Wasserhaltung)**, zur dauerhaften **Grundwasserumleitung** sowie zu den **Auswirkungen auf die Nachbargrundstücke und -bauwerke** erforderlich. Ebenso sind Erkundungen des Bodens, des Grundwassers und ggf. alter Bauwerke auf Verunreinigungen und Hohlräume durchzuführen.

Bei der Überschreitung von Grenzwerten in Grundwasser, Boden, Abfall und Abbruchsubstanz ist ein Verwertungs- und Entsorgungskonzept für die weitere Erkundung, Sanierung und Entsorgung der Verunreinigungen mit Kostenschätzungen vorzulegen. Ggf. sind die zuständigen Fachbehörden (Bodenschutz-, Wasserschutz-, Gesundheits-, Entsorgungs-, Arbeitsschutz-, Kampfmittelschutzbehörden etc.) zu informieren und die Maßnahmen sind mit diesen abzustimmen.

2. Geologischer und tektonischer Bau von Baden-Württemberg

Der geologische und tektonische Bau von Baden-Württemberg ist in den Abbildungen 1, 2, 2a, 2b dargestellt. Baden-Württemberg gehört tektonisch zum größten Teil zur **Süddeutschen Scholle**. Nach der Heraushebung von Südwestdeutschland aus dem Jurameer vor 145 Mio. Jahren kam es zu einer verstärkten Hebung im Gebiet von Schwarzwald, Vogesen und Odenwald. Als Folge dieser lokalen Aufwölbung der Erdkruste durch thermische Vorgänge im Erdmantel (Manteldiapir?) und durch Bruch- und Zerrungsvorgänge in der Erdkruste im Zuge der Alpenbildung begann vor 52 Mio. Jahren der **Oberrheingraben** als transtensive Scherzone eingebrochen. Dieser Grabenbruch wurde mit bis über 4000 m mächtigen Sedimenten gefüllt und wird von den bis über 2000 m herausgehobenen **Grundgebirgsrücken von Vogesen, Schwarzwald und Odenwald** flankiert. Dort treten harte, kristalline Grundgebirgsgesteine in Form von Gneisen, Migmatiten und Graniten zutage und prägen diese bewaldeten und tief zertalten Mittelgebirgslandschaften. Nach Osten taucht das **paläozoische Grundgebirge** unter die Erdoberfläche ab und wird von den jüngeren sedimentären Schichtstufen des **Tafeldeckgebirges** überdeckt.

Diese ursprünglich bis zu 2000 m mächtigen Sedimentschichten wurden im großen **Mitteleuropäischen Sedimentbecken** teils unter marinen und teils unter terrestrisch-limnischen Bedingungen von der noch **paläozoischen Karbon/Perm-Zeit** und während der **mesozoischen Trias-Zeit bis zum Ende der Jura-Zeit** abgelagert. Nach der tektonischen Aufwölbung von Schwarzwald und Odenwald liegen diese ursprünglich horizontal abgelagerten Sedimentschichten heute überwiegend nach Osten und Südosten geneigt. Dieses generelle Schichtfallen führte im Zusammenspiel mit der ungleichmäßigen Abtragung der unterschiedlich abtragungsresistenten Sedimentgesteine zur Bildung des sich nach Nordosten auffächernden **Schwäbisch-Fränkischen Schichtstufenlandes**. Die erste Schichtstufe über dem Grundgebirge und den Sedimentresten von Karbon und Perm bildet der **Buntsandstein**, der auch viele Höhenzüge von Nordschwarzwald und Odenwald aufbaut. Darüber liegen die Schichten des **Muschelkalks**, der aus mächtigen Karbonatsteinformationen mit zwischengeschalteten und teils ausgelaugten Salinar- und Sulfatgesteinen besteht. Die Muschelkalkoberfläche bildet die flachkuppigen Gäulandschaften zwischen Klettgau, Oberem Gäu, Stroh- und Heckengäu und Bauland. Die Oberfläche der Muschelkalkplatten ist im Klettgau und im Heckengäu entlang des Schwarzwaldrandes und in Hohenlohe, Taubergrund und Bauland verkarstet und trocken, weil dort vielerorts kein Lettenkeuper und nur eine geringe Lössbedeckung über den Karbonatgesteinen liegt. Mit zunehmender **Lettenkeuperbedeckung** wird die Landschaft ebener und ist oft mit mehreren Metern mächtigen, kaltzeitlichen **Lösssedimenten, Verwitterungsböden, Fließerden und Hangschutt** überdeckt. Beispiel ist hier die landwirtschaftlich bedeutende Fläche des Strohgäus nördlich von Stuttgart. Die erodierten mesozoischen Sedimentgesteine in Baden-Württemberg werden nahezu überall diskordant mit mehr oder weniger mächtigen, **kaltzeitlichen Verwitterungsbildungen** bedeckt. Die **Muschelkalk/ Lettenkeuper-Gäufläche** geht dann in die ansteigende und mit mächtigem Hangschutt bedeckte **Gipskeuperformation** über, die aus teilausgelaugten und ausgelaugten Sulfatgesteinen bzw. deren Rückstandsgesteinen, aus dünnen Karbonatsteinbänken und v.a. aus Tonsteinen besteht. Sie bildet den Fuß und Steilanstieg der Keuperberggländer mit Streuobstwiesen und Weinbergen. Darüber folgen die oft bewaldeten Steilstufen, Verebnungsflächen und Hochflächen des **Keuperberglandes** (Strom- und Heuchelberg, Schwäbisch-Fränkische Waldberge, Glemswald und Schönbuch), die von mächtigen Sandstein- und Mergel-schichten aufgebaut werden: **Schlifsandstein, Bunte Mergel mit Kieselsandstein, Stubensandstein, Knollenmergel und Rätsandstein**. Südlich von Stuttgart bilden die Kalk-steine, Tonmergelsteine und Sandsteine des **Frühen Jura** die **Filder-ebene**, die mit einer Auflage aus **Lösslehm** (Filderlehm) sehr fruchtbar ist. Die mächtigen Tonsteinserien des **Mittleren Jura** formen die kuplige Landschaft des Albvorlandes und den Anstieg zur Schwäbischen Alb. Die mächtigen und stark verkarsteten Kalkstein-, Riff- und Dolomitsteinformationen des **Späten Jura** bilden die steile und zerklüftete Schichtstufe der Schwäbischen Alb mit den schroffen Felskränzen des Albtraufs und mit tief eingeschnittenen Tälern.

Die zunächst kuplige und nach Südosten ebener werdende Albhochfläche geht dann in die **Akkumulationslandschaft des Alpenvorlandes** von Oberschwaben über. Dieses als "Nordalpinen Molassebecken" bezeichnete Gebiet ist mit dem bis über 6000 m mächtigen, sandig-tonigen und teils konglomeratischen Abtragungsschutt der Alpen aus der **känozoischen Zeit von Paläogen und Neogen** gefüllt. Entlang dem Alpenrand werden die Molasseschichten von den sich nach Norden vorschreitenden Alpen gestaucht, abgeschart, gefaltet und überschoben und bilden die **aufgerichtete Vorlandmolasse** und die **Faltenmolasse**. Dort entstand eine den Alpen vorgelagerte **Schichtrinnenlandschaft** mit alpenparallelen Hügelketten (Abb. 1 + 2). Die teils flächige und teils hügelige Oberfläche wird in Oberschwaben und im Allgäu großteils von den in der **Quartär-Zeit** während der **pleistozänen Kaltzeiten** durch Gletscher aus den Alpen herautransportierten und abgelagerten Sedimenten gebildet. Diese bestehen aus lehmig-steinigen Grundmoränen und kuppig-geschwungenen Endmoränenwällen ehemaliger Gletscherstände, aus langgezogenen Schotterebenen ehemaliger Schmelzwasserrinnen und örtlich aus tiefreichenden Beckentonnen, die oft mit Seen und mit verlandeten Moorflächen bedeckt sind. Auf den nicht vergletscherten Periglazialgebieten wurden Verwitterungsschutt, Frostschutt, Fließerden, Hangschutt, Lösssedimente und Talkiese- und -lehme abgelagert. Die jüngsten Sedimente, z.B. die sandigen Kiese, Lehme und Abschwemmungen in den rezenten Bach- und Flusstälern, stammen zu einem großen Teil auch aus der aktuellen **Holozän-Zeit** ab 12.000 Jahren.

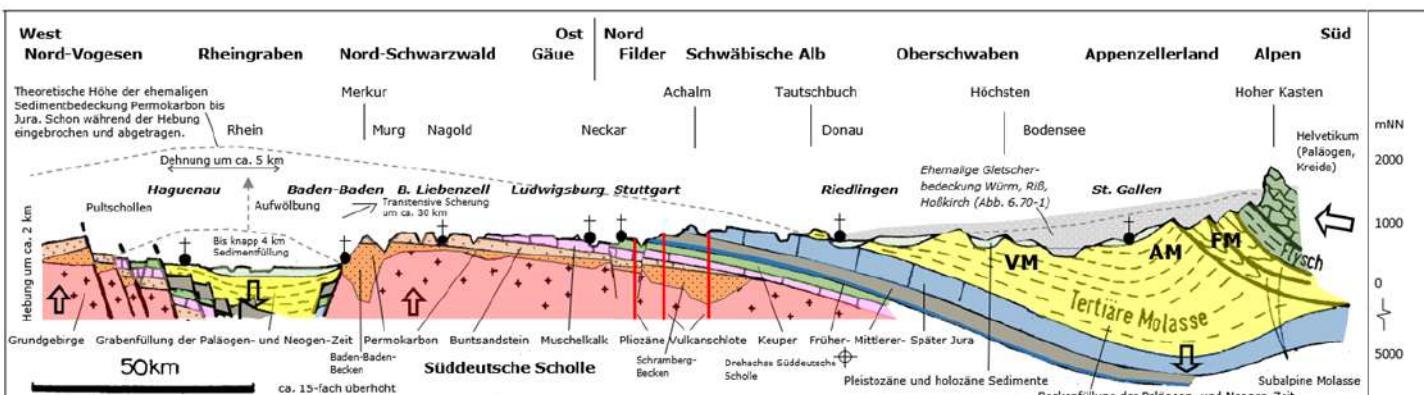
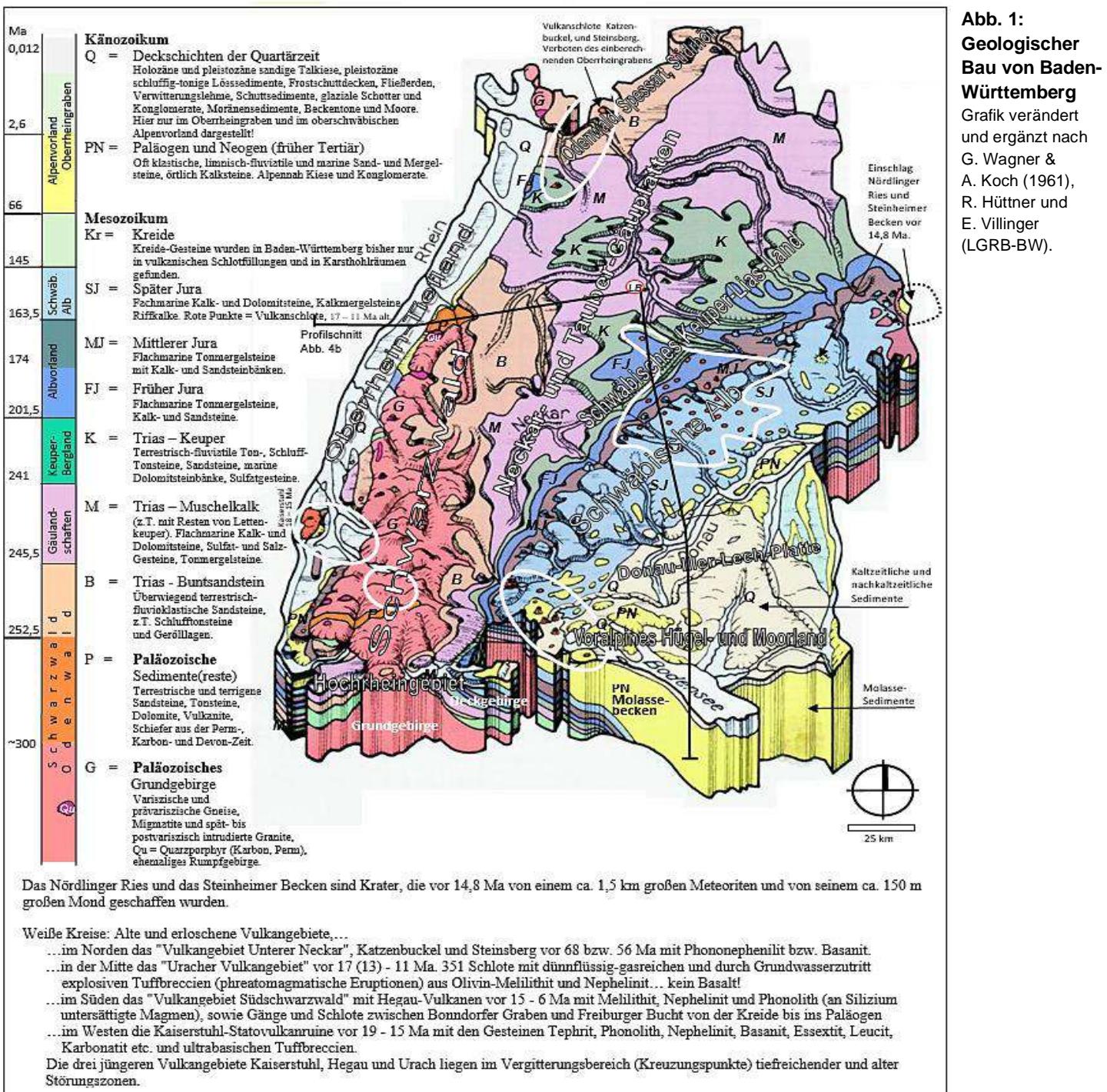


Abb. 2: Geologischer Profilschnitt von Baden-Württemberg - schematisch und ca. 15-fach überhöht.

Die geologische Karte und der Profilschnitt verdeutlichen den dreidimensionalen Aufbau des Untergrundes.

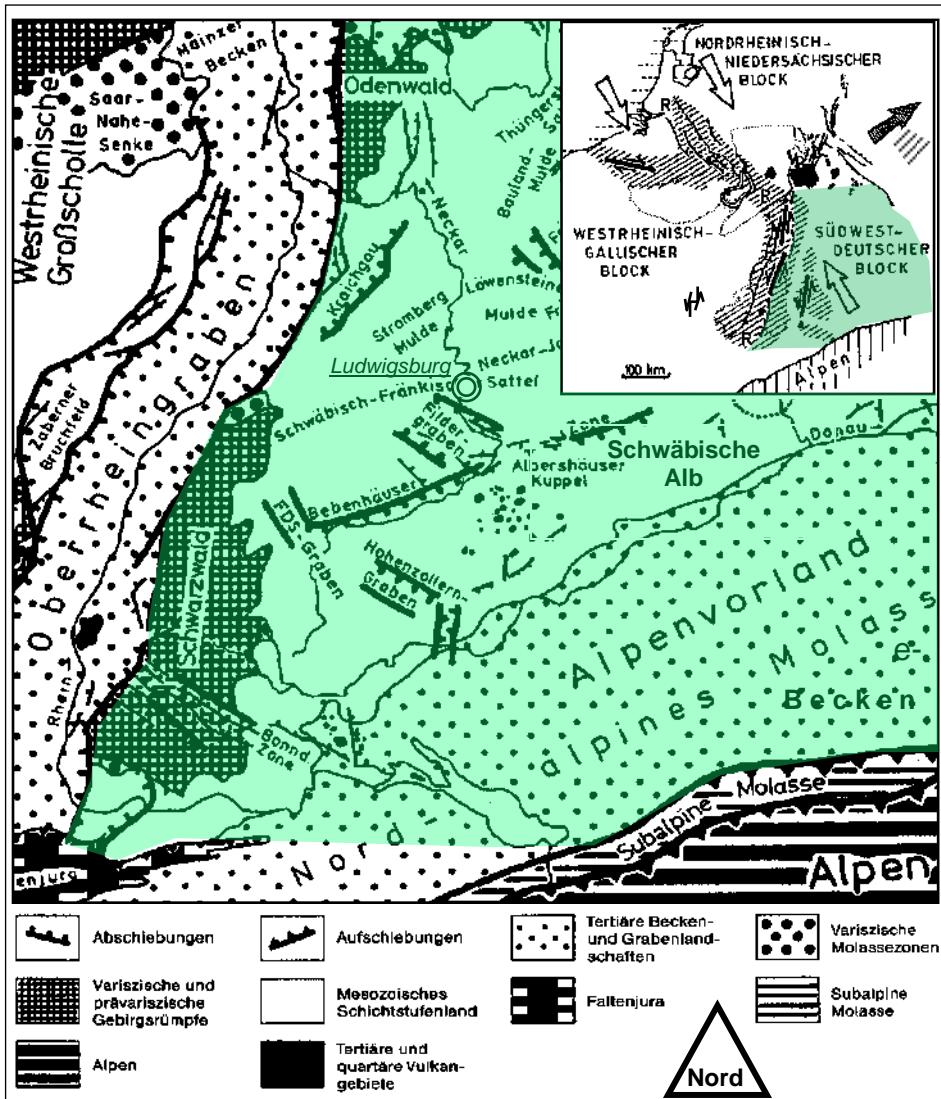
Die Pfeile zeigen die relativen Hebungen und Absenkungen und den Schub durch die Alpenbildung.

VM = Vorlandmolasse, AM = Aufgerichtet Vorlandmolasse, FM = Faltenmolasse.

Die Sedimentbedeckung über Rheingraben, Schwarzwald und Schichtstufenland wird seit etwa 145 Mio. Jahren abgetragen.

Grafik verändert und ergänzt nach: O. F. Geyer & M. P. Gwinner (1991), Geologie von Baden-Württemberg.

Abb. 1: Geologischer Bau von Baden-Württemberg
Grafik verändert und ergänzt nach G. Wagner & A. Koch (1961), R. Hüttner und E. Villinger (LGRB-BW).



Es kam zu einer Ost-West-Grabendehnung von ca. 5 km mit einem linksseitigen und transtensiven Versatz der "Süddeutschen Scholle" um ca. 30 km an der Kaiserstuhl-Scherzone nach Norden. Das Schollenmosaik der Süddeutschen Scholle ist in fraktaler Hierarchie vom Satellitenbild bis zur mikroskopischen Probe erkennbar. Der tektonische Bau, also Brüche und Gräben, Mulden und Sättel, Gewölbe, Falten, Abschiebungen und Aufschiebungen und auch die Gesteinsklüfte haben maßgeblichen Einfluss auf die Verwitterung und Abtragung und damit auch auf die Richtungen der Flüsse und letztlich auf das Gesicht der Landschaft. Das kleine Bild rechts oben zeigt die Spannungsverhältnisse in Mitteleuropa und den linksseitigen Versatz um ca. 20 - 30 km am Oberrheingraben. Die weißen Pfeile zeigen die Einspannung der Krustenteile (Blöcke) zwischen der Afrikanischen Platte mit den Alpen und dem nordeuropäischen Plattenteil. Die schwarzen Pfeile deuten die Dehnungsbewegung als Reaktion darauf an. Die Erdbebengebiete sind schraffiert. Die Bewegungen der Erdkruste sind auch heute noch aktiv. Der Südschwarzwald hebt sich mit ca. 0,1 mm/a und der Oberrheingraben verbreiterte und senkte sich mit 0,1 - 0,2 mm/a zu insgesamt 5 - 8 km Dehnung, 3,5 km Einsenkung und 5 km Abstand von der Grabensohle zu den Schultern. Die Alpen heben sich mit ca. 0,3 – 1,8 mm pro Jahr, die Erosion liegt bei 0,2 - 0,4 mm/a, die Nettohebung liegt im Durchschnitt bei ca. 0,5 mm/a. Die Adriatisch-Apulische Mikroplatte und die Afrikanische Großplatte schoben sich unter Bildung der Alpen nach Norden und Nordwesten. Afrika schiebt sich heute noch mit 5 - 9 mm/a gegen Eurasia und Adria/Apulia schiebt sich mit wenigen Millimetern/a gegen Europa (Abb. 4a und Kapitel 6).

Abb. 2a: Großtektonische Strukturen in Südwestdeutschland.

Ergänzt nach: C. Stier, H. Behmel & U. Schollenberger (1989): Wüsten, Meere und Vulkane, Baden-Württemberg in Bildern aus der Erdgeschichte. Peter Grohmann, Stuttgart. Nach O.F. Geyer & M.P. Gwinner (1991) und W. Carlè (1950).

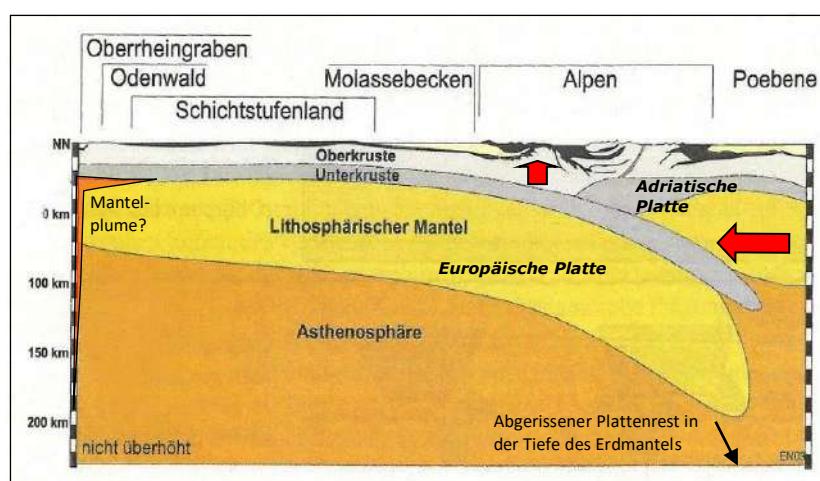


Abb. 2b: Geologischer Tiefenschnitt Südwestdeutschland - Alpen – Norditalien

Der nicht überhöhte Nord-Süd-Schnitt zeigt das Abtauchen der Europäischen Erdkrustenplatte unter die Afrikanische Platte im Bereich der Alpen. Grafik ergänzt nach O.F. Geyer & M.P. Gwinner, Geologie von Baden-Württemberg, 2022.

Informationen zur Entstehung der Alpen mit den Auswirkungen auf Deutschland und Europa gibt es in Kap. 6 der Broschüre "Geologie in Ludwigsburg" auf der Web-Seite der Stadt Ludwigsburg.

Fast ganz Baden-Württemberg und weite Teile von Bayern liegen im Bereich eines Erdkrustenteils, der "Süddeutschen Scholle" genannt wird (im Bild grün). Diese bildet ein Dreieck zwischen Oberrheingraben, Alpen, Böhmisches Scholle, Sächsischer Scholle, Soling Scholle und Rheinischem Schiefergebirge.

"Die Süddeutsche Scholle darf aber nicht als eigenständiger tektonischer Körper aufgefasst werden, sondern fußt auf dem Bild, das die geologische Karte vom Deckgebirge liefert. Der Untergrund ist hier, wie auch im übrigen Europa, tektonisch stark fragmentiert" (H. Seyfried et al. 2021: Die Landschaften von Baden-Württemberg, 2. Aufl. S. 174).

Der nordwärts gerichtete Druck der Afrikanischen Kontinentalplatte, der auch für die Bildung der Alpen verantwortlich ist und der südostwärts gerichtete Druck der Mittelatlantischen Schwelle zerscherte die Europäische Kontinentalplatte in ein komplexes System mit Kompression, Dehnung und Seitenverschiebung.

"Das setzte die gesamte süddeutsche Lithosphäre unter Spannung und führte zu einer Aufwölbung der Erdkruste um 1000 m und im Südschwarzwald um bis zu 2000 m. Die Süddeutsche Scholle riss am Oberrheingraben von Westeuropa ab und wurde seither wie ein Keil nordwärts in die mitteleuropäische Kruste vorgetrieben" (O.F. Geyer/ M.P. Gwinner 2011: Geologie von Baden-Württemberg. 5. Auflage, Seite 294).

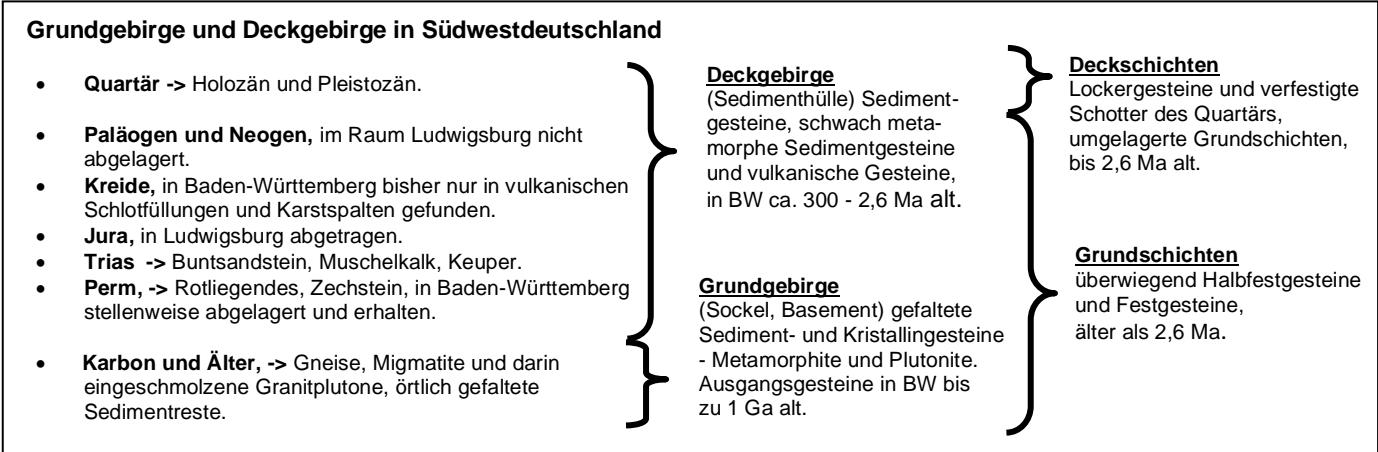
Die Zerrkräfte führten zu zahlreiche Brüche und Gräben und es entstand das Mitteleuropäische Bruchschollengebiet. Durch die Einengung und Kompression bei der Hebung und Nordverlagerung der Alpen und bei der Bildung der Pyrenäen kam es zu einer NE-SW gerichteten Erdkrustendehnung in Mitteleuropa mit dem Einbrechen des Oberrheingrabens an einer transtensiven Scherzone. Das führten vor ca. 30 Ma zu einer SW-NE gerichteten Einengung mit der Bildung einer linksseitigen horizontalen Scherbewegung.

2.1 Grundgebirge und Deckgebirge

Die oberen Bereiche der Erdkruste werden nach ihrer **Entstehungsweise** in das kristalline Grundgebirge und in das darüber liegende und damit jüngere sedimentäre Deckgebirge eingeteilt. Der **Grundgebirgssockel** besteht in Baden-Württemberg zu etwa 2/3 aus Gneisen und zu etwa 1/3 aus Graniten. Gneise sind metamorphe Gesteine, die aus ehemaligen Sedimentgesteinen oder aus Kristallingesteinen entstanden sind und die durch tektonische Vorgänge in größere Tiefen versenkt wurden. Dort wurden sie bei hohen Temperaturen aber ohne aufzuschmelzen starkem und gerichtetem Druck ausgesetzt und wurden in ihrer Zusammensetzung und kristallinen Struktur stark verändert. Granite sind plutonische Gesteine, die als Gesteinsschmelze aus großer Tiefe in die obere Erdkruste, hier in die Gneise eingedrungen, aber noch tief unter der Erdoberfläche langsam erstarrt und regellos körnig auskristallisiert sind. Das **Deckgebirge**, auch **Sedimenthülle** genannt, besteht aus geschichteten Sedimentgesteinen unterschiedlicher Zusammensetzung und Härte. Die ursprünglich in Baden-Württemberg 1000 bis fast 2000 m mächtigen Sedimentserien wurden nach der Abtragung des variszischen Gebirges vor ca. 300 Mio. Jahren im sich dann einsenkenden Mitteleuropäischen Becken in den Zeitperioden von Karbon und Perm (stellenweise), Trias und Jura und örtlich während Kreide- und Paläogen/Neogen-Zeit abgelagert. Die Schichten des Deckgebirges liegen diskordant (im Winkel) über dem Grundgebirge. Nach ihrer Ablagerung wurden die Sedimente in geringer Tiefe mit der Zeit zu kompakten und oft felsartigen Gesteinen verfestigt (Diagenese). Vor 145 Mio. Jahren wurde das Land aus dem Jurameer herausgehoben. In den folgenden Jahrtausenden wurden daher wieder große Teile dieser Sedimentkomplexe abgetragen, so dass in weiten Teilen von Baden-Württemberg das heute stark erodierte Schichtstufenland entstanden ist. In der Quartär-Zeit seit 2,6 Mio. Jahren wurden während der Kalt- und Warmzeiten des Eiszeitalters überwiegend locker gelagerte Sedimente von einigen Metern Mächtigkeit auf den Verwitterungsoberflächen des Schichtstufenlandes abgelagert. Die zeitliche Gliederung der Erdgeschichte und die Benennung der geologischen Zeiträume sind in der Abb. 3 und in den Beilagen 1 und 2 dargestellt.

2.2 Grundsichten und Decksichten

Nach der **Entstehungszeit** werden die oberen Bereiche der Erdkruste in die älteren Grundsichten und in die darüber liegenden und jüngeren Decksichten unterschieden. Als **Grundsichten** werden die oft festen und felsartigen Gesteine bezeichnet, die vor der Quartär-Zeit vor mehr als 2,6 Mio. Jahren in den Zeitperioden von Neogen und Paläogen, Kreide, Jura, Trias und älter abgelagert wurden. Im Raum Ludwigsburg bestehen diese Grundsichten aus Sedimentgesteinen des Permo-karbons und der Trias (Buntsandstein, Muschelkalk, Unterkeuper und Mittelkeuper). Höhere Keuperschichten und die Schichten der Jura-Zeit wurden in Ludwigsburg in den vergangenen 145 Mio. Jahren nach der Heraushebung des Landes aus dem Meer durch die Verwitterung und durch die Erosion der Flüsse abgetragen. Gesteinsschichten der Kreide-Zeit und der Paläogen- und Neogen-Zeit wurden im Raum Ludwigsburg nicht abgelagert. Die meistens wenig verfestigten und körnigen **Decksichten** wurden während der Quartär-Zeit in den vergangenen 2,6 Mio. Jahren in unterschiedlicher Mächtigkeit von wenigen Dezimetern bis in Ludwigsburg stellenweise über 15 Metern über den viel älteren Grundsichten diskordant abgelagert. In dieser Zeit kam es auf der Erde zu einer Anzahl von rhythmischen Klimawechseln mit Kaltzeiten von über 100.000 Jahren Dauer und Warmzeiten von 10.000 bis 30.000 Jahren Dauer. Dieser Zeitabschnitt wird Pleistozän oder Eiszeitalter genannt. Im Raum Ludwigsburg gab es aber nie eine Vergletscherung. Seit dem Ende der letzten Kaltzeit, der Würm-Kaltzeit vor etwa 11.700 Jahren wurden und werden im wärmeren Klima bis heute weitere Decksichtensedimente v.a. in den Tälern abgelagert. Dieser Zeitabschnitt wird Holozän genannt. Zu den Decksichten zählen auch die in der Quartärzeit verwitterten und umgelagerten Grundsichten, z.B. Fließerden und Frostschutt, Mergelschutt, Hangschutt und Blockschutt.



2.3 Mutterboden, Lockergesteine, Festgesteine, Bodenaushub, Bodenschutzkonzept

Aus baugrundgeologischer Sicht können **Lockergesteine** bzw. sogenannter "**Boden**" (Ton, Schluff, Lehm, Sand, Kies), **veränderlich feste Gesteine** und **Festgesteine** (felsartige Gesteine der Grundsichten) unterschieden werden. Der Begriff "Boden" wird hier im bautechnischen Sinne gebraucht, als Sammelbezeichnung aller Lockergesteine und von lockergesteinsartig verwitterten Festgesteinen und nicht im Sinne von Pflanzenstandort. Die Lockergesteine entstehen aus Festgesteinen durch Verwitterung, Abtragung, Transport und Ablagerung. Durch Verwitterung oder gelegentliche Verfestigung treten Übergänge auf, die sogenannten veränderlich festen Gesteine (Halbfestgesteine, v.a. Tonsteine, Mergelsteine etc., siehe Kap. 4.1.2). Der ganz oben liegende und belebte Mutterboden mit Humus ist einige Dezimeter mächtig und ist mit seinen vielfältigen biologischen Vorgängen die wichtigste Ressource für die Nahrungsmittelproduktion und der wichtigste Filter zum Schutz des Grundwassers. Er wird bei allen Bauvorhaben entfernt und spielt bei der Baugrubenberechnung und -beurteilung keine Rolle. Bodenschutzrechtliche Vorschriften erfordern einen sparsamen und schonenden Umgang mit diesem Boden. Bei Bauvorhaben ausgehobener Mutterboden muss an anderer Stelle wieder eingebaut werden und darf der Natur nicht verloren gehen, siehe Regelungen in Bodenschutzgesetz und Bodenschutzverordnung etc.. Es geht hier um die schonende und rechtskonforme Verwertung von Bodenaushub und um die Reduzierung von Boden- und Flächenverbrauch.

Je nach Größe des Bauvorhabens ist zusätzlich oder ergänzend zum Geotechnischen Bericht ein "**Bodenschutzkonzept**" bzw. "**Bodenschutzplan**" zu erstellen und es kann eine "**bodenkundliche Baubegleitung**" erforderlich sein. Wann und in welchem Umfang das erforderlich ist (z.B. ab 1000 m² Eingriffsfläche), regelt die Bodenschutzbehörde z.B. beim Landratsamt. Das beinhaltet nach einer Vorabstimmung mit der Behörde eine bodenkundliche Aufnahme, Bewertung und Empfehlungen wie zum Beispiel

- Nachweis der Qualifikation für bodenkundliche Begutachtung und Baubegleitung.
- Abfrage Bodenauswertungskarten (LGRB, LUBW), Forstliche Standortkarten, Moorkarten.
- Abfrage Altlastenkataster und Ergebnisse chemischer Untersuchungen, Vorbelastungen.
- Frühere Nutzung, aktuelle Nutzung, künftige Nutzung.
- Pflanzenbestand
- Bodenkundliche Bestandsaufnahme, Zustandserfassung.
- Bodentypen
- Chemische und physikalische Bodeneigenschaften, Bodenqualität, Empfindlichkeit, Bodengefüge.
- Humus-, Kalkgehalt.
- Mächtigkeit des Ober- und Unterbodens.
- Kennwerte und Bewertung der Bodenfunktionen und Schutzwürdigkeit.
- Beim BV anfallende Mengen betroffenen Oberbodens, Massenbilanzierung.
- Standort- und Planungsoptimierung zur Vermeidung und Minimierung des Flächenverbrauchs.
- Maßnahmen zur Vermeidung oder Minimierung von Schäden am Boden bei Abschub/Aushub,
- Transport, Lagerung, Weitertransport, Wiedereinbau.
- Maßnahmen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen, Vermeidung von Bodenerosion und Bodenverdichtung.
- Bewertung und Vorschläge für den Abschub/Aushub und für die Wiederverwertung,
- Wiedereinbau, Rekultivierung etc..
- Empfehlungen für die Bauausführung z.B. Baustelleneinrichtung, Baustellenablaufplan,
- Zufahrten, Bastraßen, Zwischenlager, Ausweisung von Tabuflächen.
- Einweisung und Merkblatt für ausführende Firmen und Mitarbeiter.

Der Inhalt des Bodenschutzkonzeptes ist in der DIN 19639 "Bodenschutz bei Planung und Ausführung von Bauvorhaben" geregelt. Der Bundesverband Boden e.V. hat eine Arbeitshilfe mit dem Titel „Bodenkundliche Baubegleitung (BBB), Leitfaden für die Praxis“ herausgegeben.

Generell gilt die Regel: "**Verwertung von Bodenaushub vor Deponierung**". Der ökologische wertvolle und stark humushaltige **Mutterboden** darf dem Naturkreislauf nicht verloren gehen und muss beim Aushub für das Bauvorhaben abgeschoben, ggf. zwischengelagert und an geeigneter Stelle wieder eingebaut (verwertet) werden. Auch nicht verunreinigter und bodenmechanisch geeigneter Aushub unterhalb des Mutterbodens muss nach Möglichkeit an anderer Stelle verwertet werden, z.B. als Aufschüttung zur Geländemodellierung, beim Dammbau, als Lärmschutzwall oder beim Straßenbau. Gering verunreinigter Bodenaushub muss unter Einhaltung "definierter Regeln zum Grundwasserschutz" verwertet werden. Ist eine Verwertung von gering verunreinigtem Bodenaushub zu akzeptablen Kosten nicht möglich, z.B. wegen schlechter Marktlage, zu langem Transportweg oder eben wegen zu hoher Schadstoffwerte, muss der Boden deponiert oder gereinigt werden. Näheres regeln Gesetze und Verordnungen von Bund und Ländern und die einzelnen Deponiebetreiber. Die Verwertung, Reinigung und Deponierung von Bodenaushub kann auch erhebliche Mehrkosten verursachen. Weitere Ausführungen dazu stehen in Kap. 3.6.4.

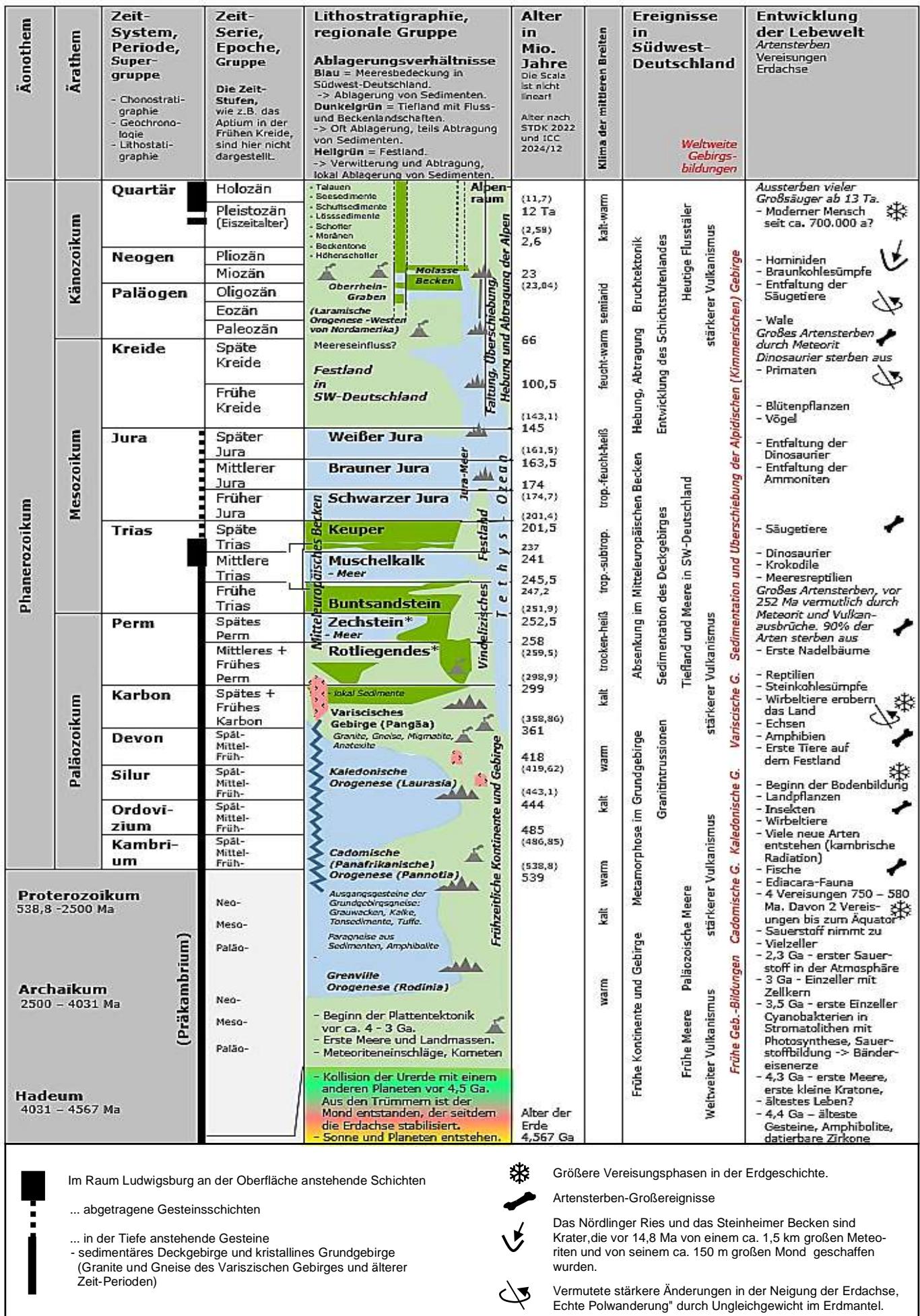


Abb. 3: Zeittafel und geologische Ereignisse in Südwestdeutschland

Altersangaben nach STDK 2022 und in Klammern nach International Chronostratigraphic Chart ICC v2024/12.

3. Die Eigenschaften des Baugrundes in Ludwigsburg

In Ludwigsburg werden die Bauwerke in den oberflächennah verwitterten, oft unterschiedlich körnigen, unterschiedlich verfestigten, schrumpfenden, quellenden und nicht vorkonsolidierten Lockergesteinen der kaltzeitlichen und der nachkaltzeitlichen Deckschichten, oder durch diese hindurch auf die wesentlich älteren und festeren Grundsichten gegründet. Bei den pleistozänen (kaltzeitlichen) Ablagerungen unterscheidet man glaziale Ablagerungen unter dem Einfluss von Gletschern und periglaziale Ablagerungen außerhalb des Einflusses der Gletscher, sowie Ablagerungen während der längeren Kaltphasen und Ablagerungen während der kurzen Warmphasen. Ludwigsburg lag im Eiszeitalter weit entfernt von den mit Eis bedeckten Glazialgebieten im sogenannten **Periglazialbereich**. Die fein- bis grobkörnigen und oft gemischtkörnigen Ablagerungen der Deckschichten wurden hier in unterschiedlichen Mächtigkeiten von Bächen und Flüssen als Tallehme und Talkiese und während der Kaltphasen durch beständig wehende Südwestwinde auf den flachkuppigen Hochgebieten und in windgeschützten Wannen und Talseiten als oft flächige Lösssedimente abgelagert. Aus dem Pliozän übergehend haben die breiten Bäche und Flüsse am Beginn des Pleistozäns ihre sandigen Kiesablagerungen zunächst noch auf dem flachgewellten Gelände als Höhenschotter abgelagert. Im Zuge der spätneogenen und pleistozänen Landhebung wurden die Flusstäler terrassenartig tiefer und schmäler eingeschnitten und die Erosionsreste der abgelagerten Terrassenschotter werden heute bei Bauvorhaben an den heutigen Talfanken angetroffen (Abb. 6, 6-1, Beil. 18). Je älter diese Schotter sind, desto mehr sind sie durch Kalk zu Konglomeraten verfestigt. Im Übergangsbereich von den gering verfestigten Deckschichten zu den festeren und auch felsartigen Grundsichten liegen die flächig verbreiteten und steinig-lehmigen Verwitterungsbildungen der Grundsichten, oft vermischt mit den Deckschichten. Diese sind während der Kaltphasen durch den Einfluss des Wassers und der Schwerkraft und durch oberflächliche Frost-Tauwechsel auf dem bis zu 100 m tief gefrorenen Permafrost-Boden entstanden (Gelifluktionsböden, Fließerden, Abschwemmmassen, Frostschutt, Hang- und Talschutt etc.). In Gebieten mit einer geringmächtigen pleistozänen Lockergesteinsauflage (Beilage 10) oder bei tiefer in den Untergrund eingreifenden Bauvorhaben treten beim Baugrubenaushub und bei Tiefgründungen die teils verwitterten, teils veränderlich festen Gesteine und die felsartigen Gesteine der Grundsichten des Gipskeupers, des Lettenkeupers und des Oberen Muschelkalks auf. Diese Gesteine sind vorkonsolidiert aber oberflächennah und z.T. auch tiefer oft angewittert, entfestigt und stärker geklüftet. Sie sind oft zu einem mehr oder weniger steinigen Boden mit einer tonigen Matrix verwittert und können dann plastisch sein. Bindige Lockergesteine und veränderlich feste Gesteine sind in Abhängigkeit von ihrer Verwitterung und Konsistenz ein durchschnittlicher bis ungünstiger Baugrund. Festgesteine und nichtbindige Lockergesteine sind ein durchschnittlicher bis günstiger Baugrund. Gering- bis unverwitterte, felsartige und sehr kompakt gelagerten Festgesteinen sind bodenmechanisch i.d.R. ein günstiger Baugrund (Hohlräume und Klüfte beachten), können beim Baugrubenaushub aber Mehrkosten durch Meißelarbeiten verursachen (alte DIN 18300 und Kapitel 4.6, Tabelle 3). Bei Bauvorhaben, die in Lockergesteinen mit weicher Konsistenz gegründet werden sollen, oder die hohen Ansprüche an die Baugrundqualität stellen, wird das Lockergestein ausgetauscht oder durch Zumischungen verfestigt, oder es wird durch die Lockergesteinsschicht auf den festeren oder felsartigen Untergrund durchgegründet (Tiefgründung, Kapitel 4.3).

Die **Verwitterungsklassen** der Gesteine sind in Kapitel 4.2.7 dargestellt. Die Bildtafeln 5, 6 und 9 zeigen drei Baugruben in Ludwigsburg. Hier ist der Aufbau des Baugrunds – Auffüllung, Mutterboden, Deckschichten, Grundsichten – zu sehen.

3.1 Grundsichten (Paläozoikum, Mesozoikum, im Bereich von Ludwigsburg 299 Ma bis 229,5 Ma)

Im tieferen Untergrund von Ludwigsburg liegen trogförmige und flächige Ablagerungsreste aus den paläozoischen Zeitaltern von **Karbon** und **Perm** (361 bzw. 299 - 252,5 Ma) über dem variszisch-kristallinen und älteren Grundgebirgssockel. Darüber liegen die ca. 260 m mächtigen Schichten des **Buntsandsteins** (~ 252,5 – 245,5 Ma, Mesozoikum, Trias), dessen obere Schichtglieder, der Plattensandstein und die Röttone, bei den Grundwasser-Tiefbohrungen in Hoheneck und im Mathildenhof bei 60 mNN erreicht wurden.

3.1.1 Muschelkalk (Unterer Muschelkalk → Freudenstadt-, Jena-Formation, ~ 245,5 - 243,5; Mittlerer Muschelkalk → Karlstadt-, Heilbronner-, Diemel-Formation, ~ 243,5 - 242,5 Ma; Oberer Muschelkalk → Trochitenkalk-, Rottweil-, Meißner-Formation, ~ 242,5 - 241 Ma)

Der Muschelkalk ist über dem Buntsandstein die zweite Schichtstufe in Baden-Württemberg und bildet zwischen Klettgau und Bauland die nach Norden breiter werdenden Neckar- und Taubergäuplatten. Während der Muschelkalkzeit kam es durch einen tektonisch bedingten Anstieg des Meeresspiegels zur zyklischen Überflutung des Mitteleuropäischen Beckens durch ein flaches und maximal 100 m tiefes Randmeer des großen Tethys-Meeres (Meer zwischen dem damaligen Afrika und Eurasien) mit episodischen Abschnürungen vom Ozean. Bei trocken-heißen und wüstenhaften Klimaverhältnissen, ähnlich denen im Persischen Golf wurden in dem stark salzhaltigen Meerwasser feinkörnige Ton- und Karbonatschlämme, karbonatische Schalenreste von Meerestieren, Muschelriffe und nach der Eindampfung des Wassers in den zeitweise ganz abgeschnürten und sehr warmen Meeresbecken und Lagunen auch mächtige evaporitische Sedimente (Gips (Anhydrit), Steinsalz, Kali- und Magnesiumsalz) abgelagert (bioklastische, chemisch-biogene und chemische Sedimente).

Im Raum Ludwigsburg sind der ca. 55 mächtige **Untere Muschelkalk** und der ca. 63 m mächtige **Mittlere Muschelkalk** nicht an der Landschaftsoberfläche aufgeschlossen. Der Mittlere Muschelkalk besteht aus den evaporitischen Ablagerungen Gips, Anhydrit, Steinsalz und Kalisalz mit Tonmergelsteinen und Dolomitsteinen. Die Salzgesteine sind im Bereich von Ludwigsburg durch das Grundwasser schon ausgelaugt, die Sulfatgesteine befinden sich im Stadium der Auslaugung. Darüber folgt der ca. 85 m mächtige **Obere Muschelkalk** als Basis der Gäuflächen, der oft auch bis zur Erdoberfläche reicht.

Die Gesteine des Oberen Muschelkalks sind als geklüftete Felsformationen an den Flanken der tiefer eingeschnittenen Täler von Neckar, Enz, Gleis, Rems und Murr zu sehen. Ursache für die starke und hangparallele Zerklüftung (Hangzerreißungsspalten) ist das Nachsacken der Kalksteine durch die Salz- und Sulfatauslaugung im darunter liegenden Mittleren Muschelkalk. Gute Aufschlüsse gab es in Ludwigsburg im heute verfüllten Steinbruch Hubele an der Marbacher Straße. (Bildtafel 13). Dort gegenüberliegend und im Schlossgarten sind heute noch alte Steinbruchwände zu sehen. An den Talflanken des Neckars, v.a. an den Prallhängen zwischen Neckarweihingen und Poppenweiler, ist der höhere Teil des Oberen Muschelkalks breit aufgeschlossen. Der Obere Muschelkalk besteht im oberen Teil aus dem 5 bis 10 Metern mächtigen, gelbgrauen, kavernösen teils verkarsteten und massig-harten Trigonodusdolomit mit Bankdicken von etwa 0,5 bis 2 m. Dieser verwittert zu einem schluffigen Feinsand. Darunter folgen graublaue und hell- bis dunkelgraue, gut gebankten, teils plattige und dichte mikrokristalline Kalke und bioklastische Schalentrümmerkalke mit zwischengelagerten dünnen und dunkelgrauen Tonstein- und Tonmergelsteinfugen (Abb. 5a). Die Karbonatgesteine sind oberflächennah oft deutlich aufgelockert, entfestigt und tonig und gehen in unterschiedlichen Tiefen in schwer lösbarer und klüftiger Fels bis Bodenklasse 7 nach der "alten DIN 18300" über. In Oberflächennähe und besonders in Hanglagen sind diese Felsschichten in der Regel plattig bis dünnbankig nach Schichtfugen und Klüften zerlegt. Die Klüfte im Muschelkalk stehen in der Regel senkrecht. In den oben genannten Aufschlüssen können zwei Kluftscharen (K 1: N 10 - 25° Ost, K 2: N 110 - 130°) unterschieden werden, deren Abstände zur Tiefe rasch abnehmen. Der Obere Muschelkalk ist je nach Felsqualität und Verwitterungsgrad oft ein günstiger Baugrund mit hoher Druckfestigkeit, aber es können Reisan- und Meißelarbeiten beim Aushub erforderlich sein. Bei einer starken und tieferen Entfestigung und Zerkleinerung kann er aber örtlich auch ein ungünstiger Baugrund sein. Gründungsprobleme können bei Verkarstung in Verbindung mit offenen oder lehmgefüllten Spalten und am Hang auftreten. Als Beispiel wird die Flachgründung des Marstall-Zentrums genannt. Hier war die etwa 1,5 m mächtige Steinbank des Sphaerocodienkalks örtlich bis auf dünne rostige Schlufflagen vollständig weggelöst. Dementsprechend musste tiefer gegründet werden. **Das Strohgäu ist ein Erdfallgebiet** und in Ludwigsburg sind bisher 15 Karststrukturen an der Oberfläche bekannt oder digital kartiert worden (oft als vom Muschelkalk durch den Lettenkeuper hochbrechenden Karbonatkarst und seltener als Sulfatkarst im Gipskeuper) (Kap. 3.6.2, Abb. 11b, 11c). Vereinzelt sind tiefe und mit lehmig-steinigen Versturzmassen plombierte **Erdfälle** aufgetreten, so in Poppenweiler, am Kugelberg und im Favoritepark. Im Bereich der steilen und durch die Verkarstung im Untergrund stark zerklüfteten Felshänge im Neckartal kommt es immer wieder zu Steinschlägen und Felsabbrüchen nach hangparallelen Klüften und zu Rutschungen im Hangschutt (Abb. 5f). Die harten und oft klüftigen Kalksteinbänke des Oberen Muschelkalks wurden in Ludwigsburg in den ehemaligen Steinbrüchen Hubele im Neckartal und am Blühenden Barock abgebaut und zu Bausteinen, Schotter und Zement verarbeitet.

3.1.2 Lettenkeuper (Unterer Keuper, Erfurt-Formation, ~ 241 - 237,5 Ma)

Mit dem Beginn der Keuper-Zeit hat sich das Meer wieder langsam und zyklisch aus dem Mitteleuropäischen Becken zurückgezogen. Zur Zeit des Lettenkeupers wurden bei einem engen Wechsel marine Karbonat- und Tonsedimenten, festländisch geprägte klastisch-fluviatile Sedimente und deltaische, lagunäre und limnische Schlammersedimente mit Brackwassereinfluss in reliefarmen Tiefland-Flussebenen, in Seen, in Sümpfen und in von Gezeiten beeinflussten Meeresbuchten (Watt) abgelagert. Das Klima war eine arides bis semiarides und auch feuchtwarmes Monsunklima und dieser Ablagerungsraum war nur durch schmale und flache Pforten mit dem Weltmeer verbunden. Der Lettenkeuper bezeugt mit seinem raschen Wechsel der Gesteine und der Fossilgemeinschaften den Übergang von der rein meeresgeprägten Muschelkalk-Zeit zu den stärker festländisch beeinflussten Ablagerungsverhältnissen der Keuper-Zeit.

Auf den Gäuflächen wird der Obere Muschelkalk oft von den wechselnd mächtigen Erosionsresten des **Lettenkeupers** bedeckt. Der Lettenkeuper bildet keine eigene Schichtstufe und besteht aus einer engen Wechselfolge von deutlich geschichteten, graugrünen bis schwarzgrauen und veränderlich festen, dolomitischen Ton- und Schluffsteinbänken, gelbgrauen bis dunkelgrauen Dolomitsteinbänken und graugelblich bis graugrünen, tonig gebundenen und unterschiedlich mächtigen Sandsteinlagen (Abb. 5b). Die Hartgesteine führen oft Grundwasser, die Tonsteine sind eher wasserstauend (schichtiger Kluftgrundwasserleiter). Die Mächtigkeit des Lettenkeupers lag im Raum Ludwigsburg ursprünglich bei etwa 23 m, ist aber vielerorts durch Abtragung deutlich reduziert. Im nördlichen Markungsgebiet treten im oberen Lettenkeuper die 5,5 bis 8,5 m mächtigen, recalcitisierten Dolomite des "Hohenecker Kalks" auf, der hier den Lingula-Dolomit und die Grünen Mergel als Flachwasserfazies vertritt. Dieser wurde früher in zahlreichen kleinen Steinbrüchen abgebaut, die heute großteils verfüllt sind (Kugelberg, Mäurach). Der unverwitterte bis mäßig verwitterte und kompakte Lettenkeuper, v.a. die Karbonat- und Sandsteinbänke, ist meistens ein günstiger Baugrund aus leicht lösbarem Fels der Bodenklassen (5) - 6 und selten schwer lösbarem Fels der Bodenklasse 7 nach der "alten DIN 18300" (Hauptsandstein). Bei Bauvorhaben werden auch oft die oberflächennah verwitterten, entfestigten, veränderlich festen, mehr oder weniger setzungsempfindlichen Tonsteine und aufgeweichte, bindig-kompressible Verwitterungstone des Lettenkeupers angetroffen. Nicht selten trifft man unter einer harten Felsbank wieder verwitterte und aufgeweichte Tonsteine an, was Gründungsprobleme verursachen kann. Verwitterter Lettenkeuper (Tonstein -> bindige und weiche Tonmergel) ist ein durchschnittlicher und gelegentlich auch ein ungünstiger Baugrund, der unterhalb des Gründungsniveaus dann z.B. durch Ausgleichsbeton ersetzt werden muss. Zu beachten ist, dass die Verwitterung an den Talflanken, besonders innerhalb der Tonsteinserien deutlich tiefer reicht als unter ebenem Gelände. Hier sind auch Rutschungen an tonigen Gleithorizonten nicht ausgeschlossen. Im Bereich des Arsenalplatzes stehen harte Dolomitsteinbänke des oberen Lettenkeupers ab 2 bis 3 m unter Gelände an. Dies trifft auch für größere Bereiche in Eglosheim zu, wo der Hohenecker Kalk bereits in Oberflächennähe unverwittert und ausgesprochen massig ausgebildet ist (Abb. 5f). Die Gesteine des Lettenkeupers und v.a. die Sandsteine wurden in Ludwigsburg in den ehemaligen Steinbrüchen in Hoheneck und in Eglosheim-Mäurach abgebaut und als Baumaterial verwendet.

3.1.3 Gipskeuper (Mittlerer Keuper, Grabfeld-Formation, ~ 237,5 - 233 Ma)

Während der Gipskeuper-Zeit kam es bei einem wechselhaft feuchten bis trocken-ariden Warmklima zur Bildung von mächtigen Schlamm- und Tonablagerungen mit einzelnen Gips- (Anhydrit)- und Karbonatsteinlagen durch eindampfendes Meerwasser in einem periodisch trockenfallenden und brackisch-lagunären Flachmeer. Die mächtigen Sandsteinschichten im Mittleren und Oberen Keuper wurden fluviatil aus Hochländern im weit nördlich gelegenen Fennoskandia und später auch aus dem näher und südöstlich gelegenen Vindelizischen Land herantransportiert und bezeugen wieder starken festländischen Einfluss mit Fluss- und Schwemmlandschaften und mit großen Deltagebieten in oft abflusslose Seen in Tiefländern.

Der ursprünglich etwa 100 m mächtige **Gipskeuper** ist auf der Ludwigsburger Markung westlich des Neckars schon stark abgetragen. Zusammenhängende Gipskeuperflächen sind dort meistens unter einer größeren Lehmdecke verborgen und besonders in den südlichen, westlichen und nordwestlichen Stadtteilen verbreitet. Dort erreicht der Gipskeuper eine Mächtigkeit von wenigen Metern bis maximal 35 m im Bereich des Salonwaldes. Die ursprünglich stark gipsführenden Tonsteine der ca. 15 - 18 m mächtigen Grundgipsschichten sind hier bis auf Reste nördlich Tambourstraße, Wüstenrot und im Bereich Salonwald fast vollständig ausgelaugt, konsolidiert und tiefgründig zu schwachschichtigen, plastifizierten, veränderlichfesten, bindig-kompressiblen und setzungsempfindlichen Auslaugungsschluffen und zu Zellenkalken verwittert (Entwicklungsstadium 4). Hohlräume, die bei der Gipslösung im Untergrund entstehen können, wurden in Ludwigsburg noch nie festgestellt. Sie sind unter den aufgezeigten geologischen Verhältnissen auch unwahrscheinlich. Der ausgefällte und abgelagerte Gips wurde diagenetisch in Anhydrit und später wieder in Gips umgewandelt. Gründungsprobleme sind im Gipskeuper daher in der Regel nicht zu erwarten, sieht man von einer gegenüber dem Lettenkeuper deutlich geringeren zulässigen Sohlspannung ab, z.B. im Industriegebiet südlich der Kammererstraße. Der verwitterte Gipskeuper hat meistens eine durchschnittliche Baugrundqualität. Bei Gründungen sollte der natürliche Feuchtezustand weitgehend erhalten bleiben. Anders ist es bei Gründungsmaßnahmen im Grundwasser, da die zu tonigen Schluffen verwitterten Gipskeuperschichten dann aufweichen und nur wenig tragfähig sind. Sie müssen unter den Fundamenten ausgeräumt werden, z.B. örtlich im Stadtteil Grünbühl. Bei hohen Einzellasten ist in solchen Situationen eine Tiefgründung auf Lettenkeuper zweckmäßig. Das Grundwasser im Gipskeuper kann wegen des hohen Sulfatanteils betonangreifend sein. In den flachwelligen Landschaftsteilen des Strohgäus und am Fuß der Keuperberge haben sich im Gipskeuper als Folge der Sulfatauslaugung v.a. in den Grundgipsschichten oft flache und breite Talzüge und Geländesenken mit Sumpfflächen gebildet (Subrosionslandschaft). In Ludwigsburg sind das der Altachgraben und die Tallage im Bereich Monrepos. Man nimmt an, dass die Bildung der Strohgäufläche stark mit der Auflösung der Sulfatschichten im Gipskeuper auf breiter Front zusammenhängt. Die tonigen Verwitterungsrückstände des Gipskeupers und die oft stark organisch beeinflussten jüngeren Talablagerungen sind hier ein ungünstiger Baugrund. Östlich des Neckartals ist der Gipskeuper direkt am Lemberg unter einer Kappe aus Schilfsandstein in nahezu voller Mächtigkeit von ca. 100 m erhalten (Gips und Anhydrit im Entwicklungsstadium 1 - 3). Dieser sogenannte Zeugenberg ist, ebenso wie der im Westen gelegene Hohenasperg durch Reliefumkehr infolge einer tektonischen Tieflage entstanden und schützt hier den Gipskeuper vor der Abtragung (Abb. 4 und Kap. 3.3). Der Gipskeuper am Anstieg zum Lemberg besteht aus mächtigen und oft tief verwitterten, roten, grauen, braunen, violetten und olivgrünen Tonsteinen mit Kalk-knollen und mit knolligen und dünnbankigen Lagen aus Anhydrit der oberflächennah unter Wassereinfluss in sich auflösenden Gips umgewandelt wurde (Abb. 5f). Die Tonsteine werden von geringmächtigen Dolomitsteinbänken durchzogen und gegliedert (Abb. 5d). An den Gipskeuperhängen sind v.a. im Bereich der wasserstauenden Verwitterungsschichten Rutschungen möglich. Die Verwitterungsgrade der Keuper-tonsteine werden in Kapitel 4.2.7 erläutert.

Der geringmächtige **Schilfsandsteinrest** (Mittlerer Keuper, Stuttgart-Formation, ~ 231 – 229,5 Ma), der auf der Kuppe des Lembergs über dem Gipskeuper liegt, ist durch Reliefumkehr in einer tiefer liegenden tektonischen Struktur (Graben, Mulde) vor der Abtragung geschützt worden (Abb. 7, 8). Er spielt als Baugrund in Ludwigsburg keine Rolle, wurde hier aber in früherer Zeit in einem Steinbruch abgebaut. Der feinkörnige und gut zu bearbeitende, grünliche und gelblich bis rötliche Schilfsandstein mit einem hohen Ton- und Glimmeranteil (Arkosesandstein) ist ein beliebter Baustein für Gebäude, Mauern und Fußböden in Ludwigsburg (Schloss) und im Großraum Stuttgart, und wird weiterhin in einigen Steinbrüchen in den Keuperbergwäldern abgebaut.



Abb. 3a: Baugrube in Ludwigsburg am Salonwald.

Löslehm und Löss über freigelegter Baugrubensohle aus Gipskeuper (ausgelaugte Grundgipsschichten).

Mehr Details zu den Grundschichten sind in der Broschüre "Geologie in Ludwigsburg" dargestellt.

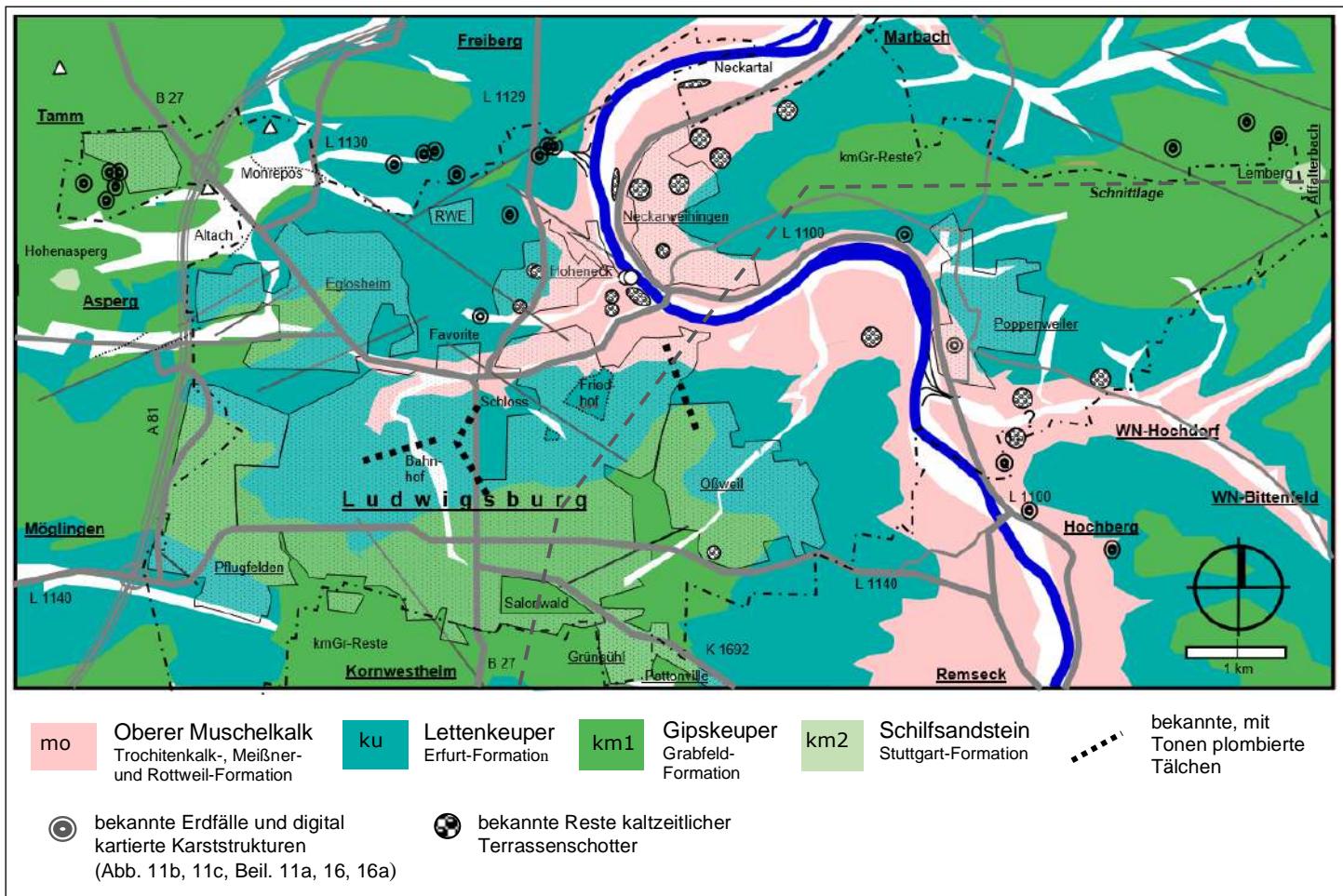


Abb. 4: Karte der geologischen Grundsichten in Ludwigsburg

Dargestellt sind die teils bekannten und teils vermuteten Ausstriche der Grundsichten von Oberem Muschelkalk, Lettenkeuper, Gipskeuper, Schilfsandstein und größere Talauen. Die 0,5 m bis über 10 m mächtigen Deckschichten aus Lösslehm, Löss, Verwitterungslehmen, Fließerden und Schuttmassen sind hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt (abgedeckte Karte). Sie sind in der Baugrundkarte M 1 : 10000 in Kapitel 8 dargestellt. Die offizielle geologische Karte, Bereich Ludwigsburg, herausgegeben vom LGRB-BW, ist in Abb. 5a zu sehen.

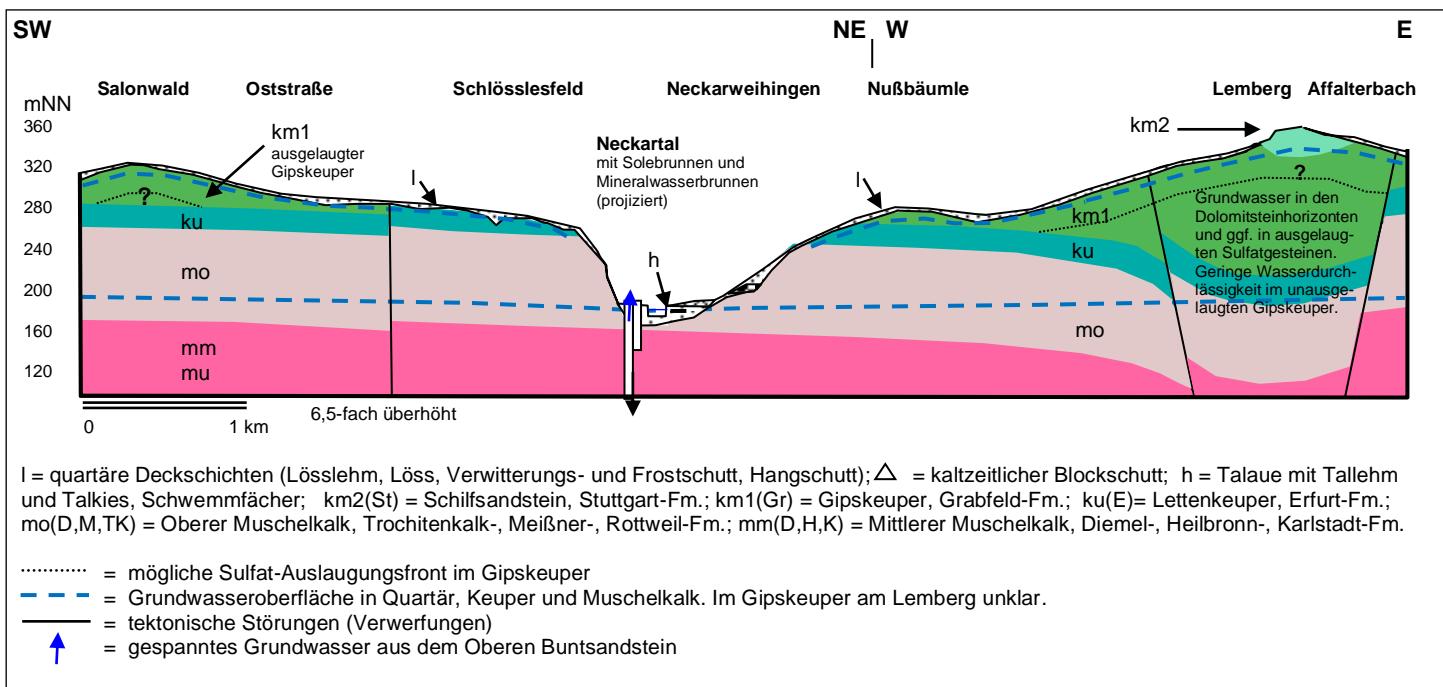


Abb. 5: Geologischer Profilschnitt durch die Gemarkung Ludwigsburg (schematisch und überhöht)

Die geologische Grundsichtenkarte und der Profilschnitt veranschaulichen den dreidimensionalen Aufbau des Untergrundes. Weitere Darstellungen und die geologische Karte mit den Deckschichten siehe Beilagen 4, 4a, 4b und 9, 9a.

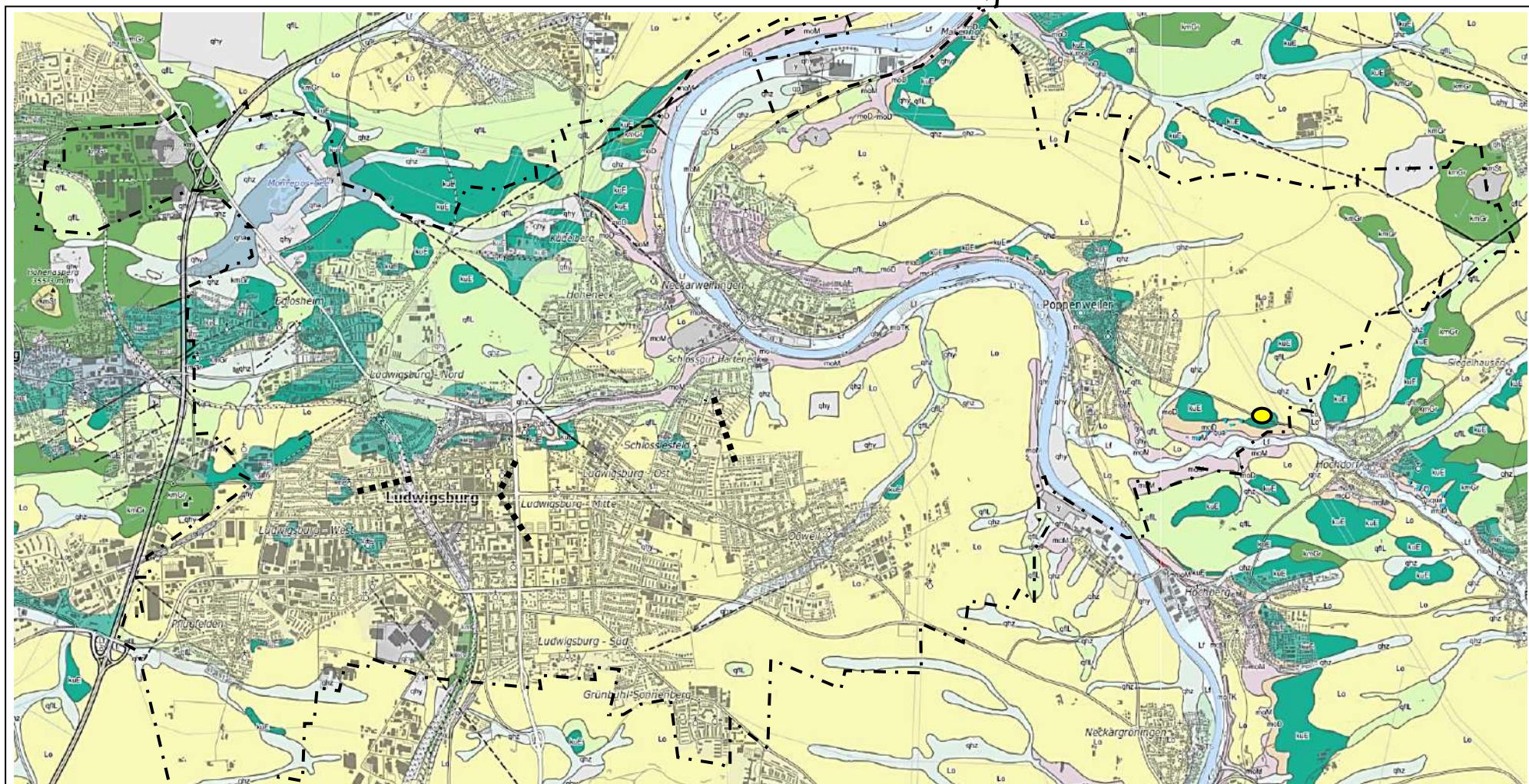


Abb. 5a: Geologische Karte von Ludwigsburg.

Ausschnitt aus: Geologische Karte von Baden-Württemberg. Kartenviwer des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg, RP Freiburg 2024.

Holozäne und pleistozäne Deckschichten

[Grey box]	qhy Anthropogene Auffüllung
[Dark blue box]	pha Holozäne Altwasser-ablagerungen, Anmoor
[Light grey box]	phz Holozäne Abschwemmmassen
[White box]	Lf Auenlehm (oft anthropogen)
[Yellow box]	Lo Lösslehm, Löss

Keuper

[Light green box]	kmSt Schilfsandstein Stuttgart-Formation
[Olive green box]	kmGr Gipskeuper Grabfeld-Formation
[Teal box]	kmE Lettenkeuper Erfurt-Formation

Oberer Muschelkalk

[Light green box]	moD Trigonodus-Dolomit Rotweil-Formation
[Pink box]	moM Ceratitenkalk Meißen-Formation
[Light pink box]	moTK Trochitenkalk-Formation

Karsterscheinungen siehe Abb. 11b, 11c

Tektonische Störungen,
z.T. vermutet

Bekannte, mit Tonen
plombierte Tälchen

Ehem. Kiesgrube mit Travertin
von Poppenweiler



Nord

0 1 km

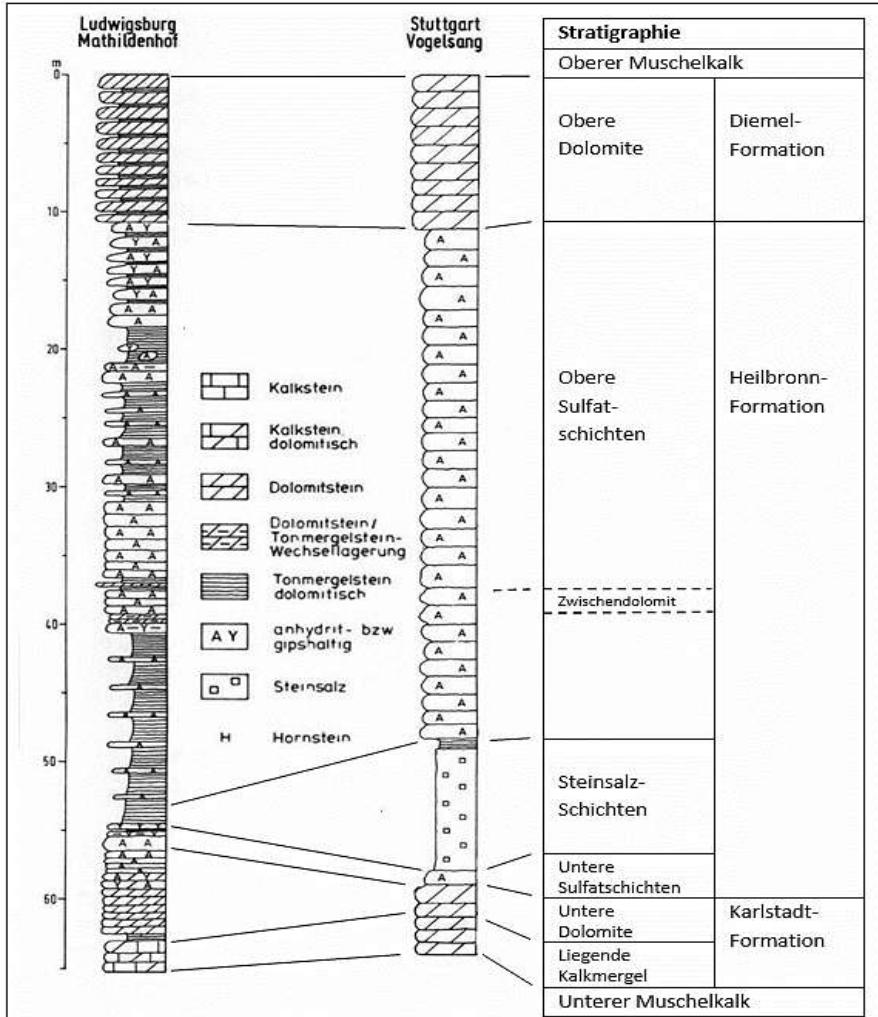


Abb. 5a: Geologische Profile des Mittleren Muschelkalks

(Diemel-, Heilbronn-, Karlstadt-Formation)

Links: Mittlerer Muschelkalk in Ludwigsburg (Grundwasserbohrung Mathildenhof) mit ausgelaugten Steinsalzschichten und Sulfatschichten in fortschreitender Auslaugung.
Rechts zum Vergleich: Mittlerer Muschelkalk in Stuttgart mit vollständiger Salinarformation.

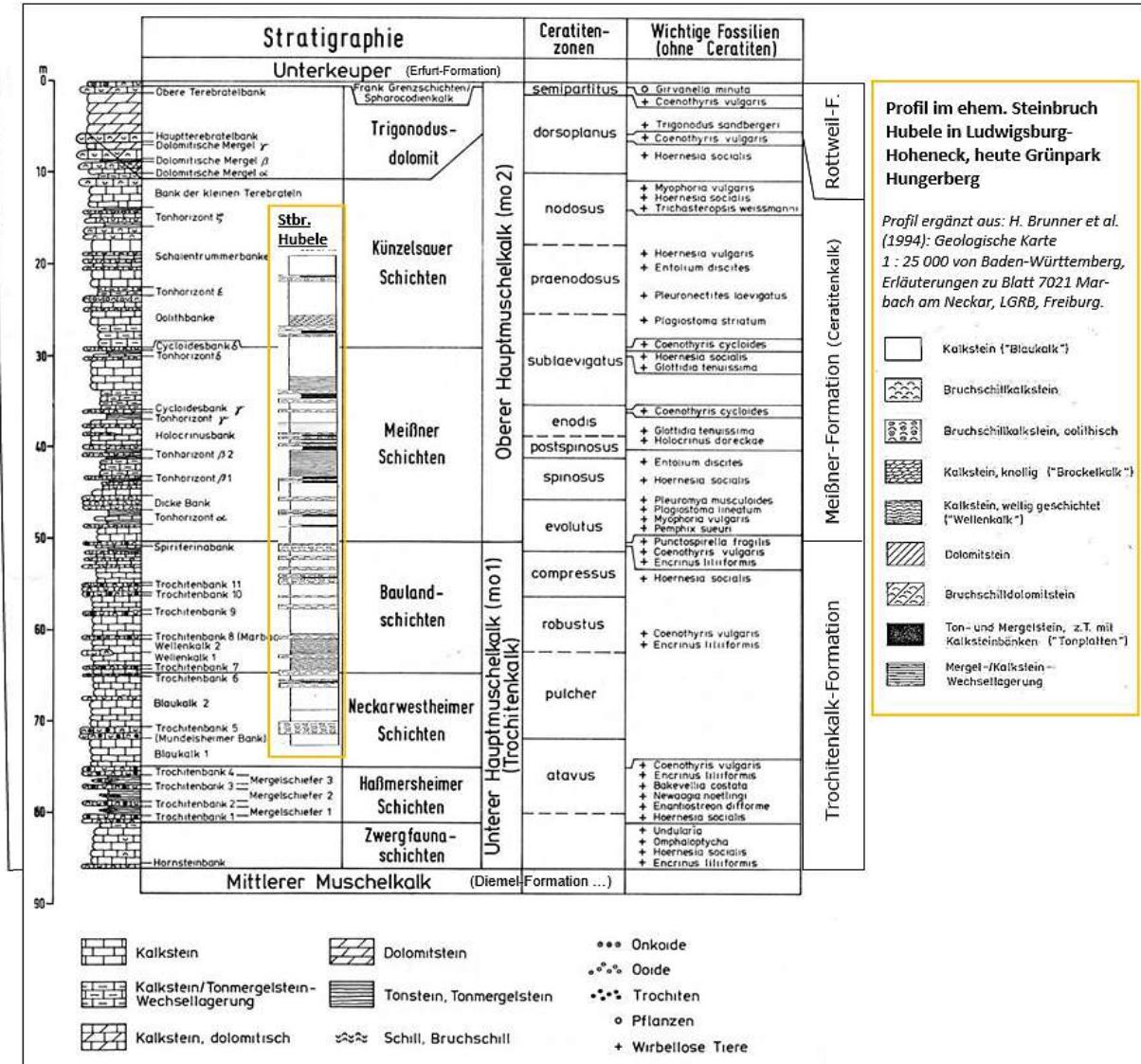


Abb. 5b: Geologisches Standardprofil des Oberen Muschelkalks

(Rottweil-, Meißner- und Trochitenkalk-Formation) im Raum Stuttgart

Schichtprofile ergänzt aus: H. Brunner (1998): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1 : 50 000, Erläuterungen zum Blatt Stuttgart und Umgebung. LGRB-BW, Freiburg.

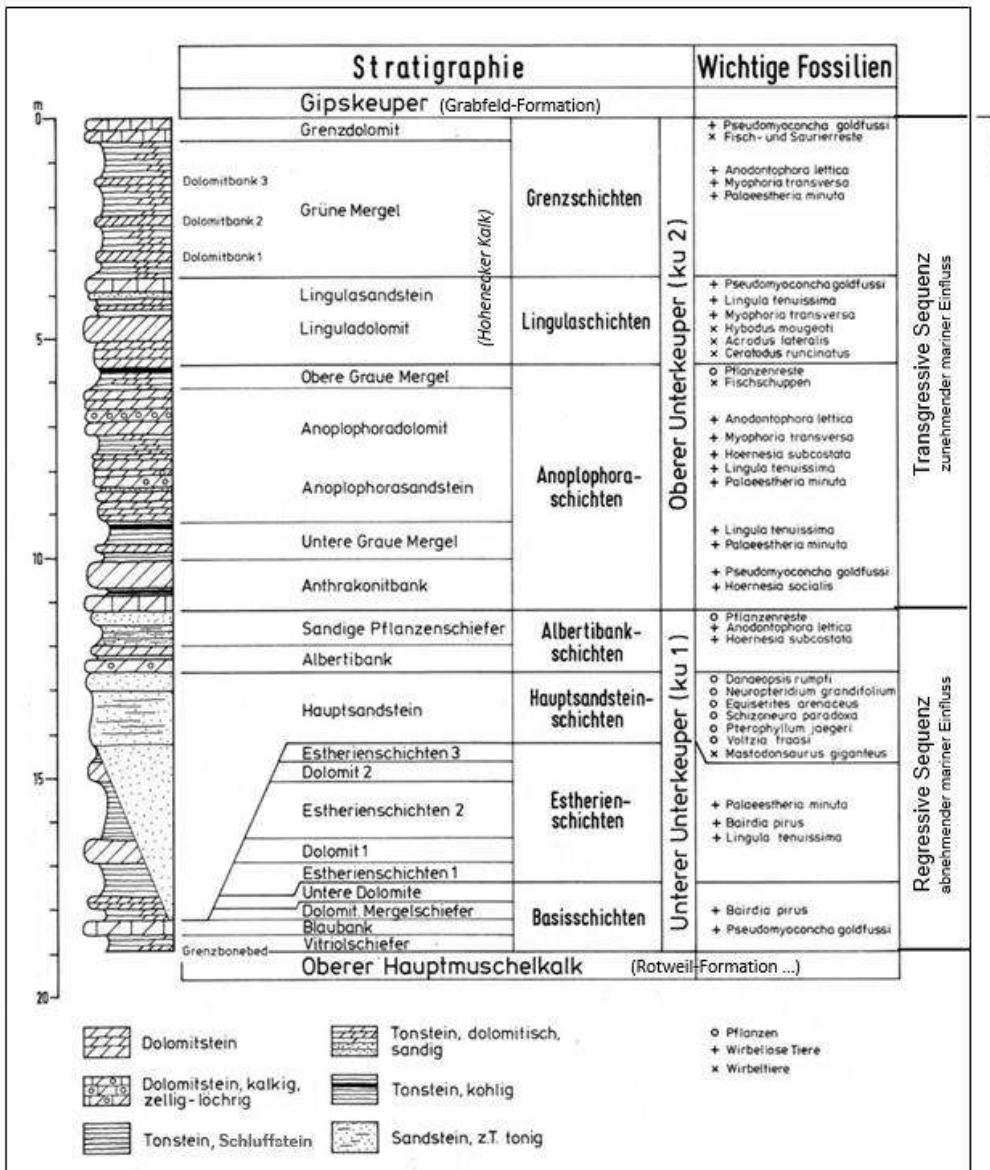


Abb. 5c: Geologisches Standardprofil des Lettenkeupers (Erfurt-Formation)

- Unterer Keuper - im Raum Stuttgart

Schichtprofile ergänzt aus: H. Brunner (1998): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1 : 50 000, Erläuterungen zum Blatt Stuttgart und Umgebung. LGRB-BW, Freiburg.

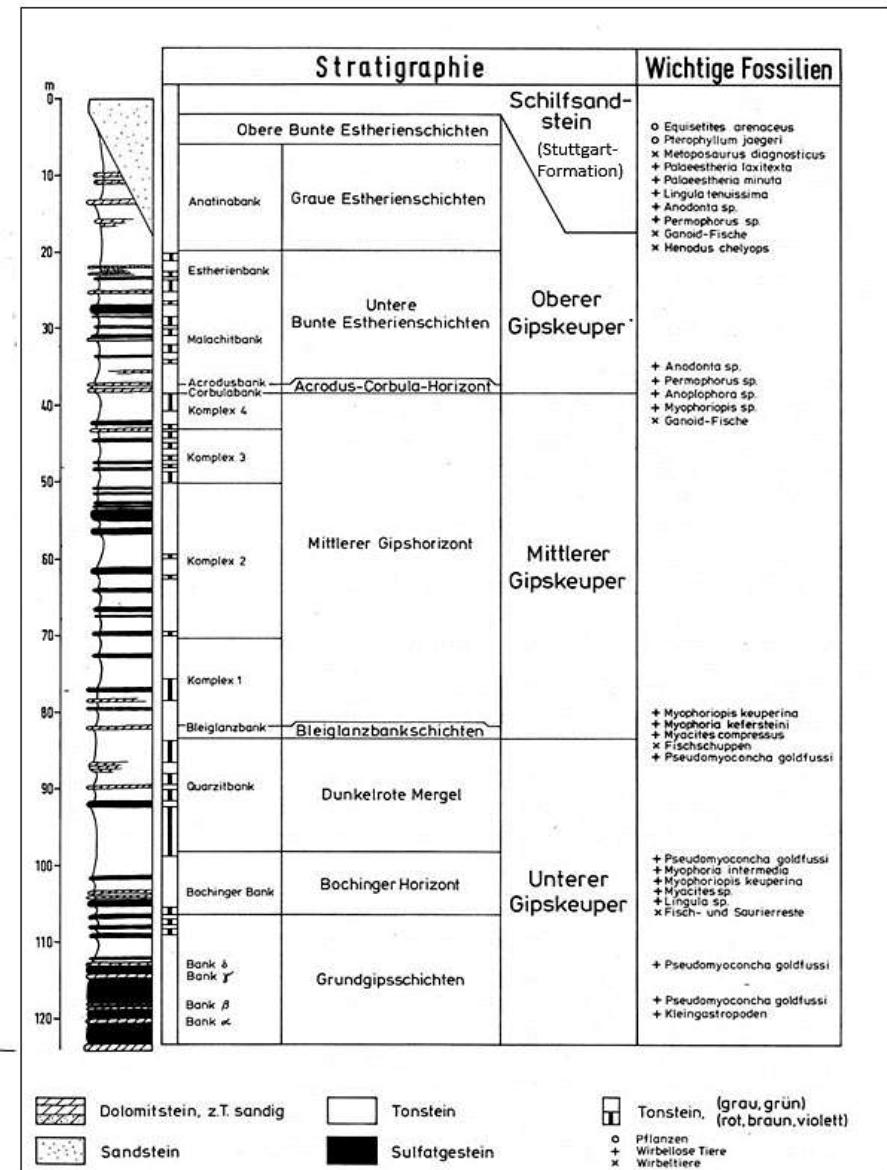


Abb. 5d: Geologisches Standardprofil des Gipskeupers (Grabfeld-Formation)

- Mittlerer Keuper - im Raum Stuttgart

Die Sulfatgesteine (Gips und Anhydrit) unterliegen oberflächennah, in Hangbereichen, in Tallagen und in Klingen bevorzugt der Auslaugung durch versickerndes Niederschlagswasser und Grundwasser (Subrosion). Das kann zur Bildung von Hohlräumen führen, hat Auswirkungen auf die Baugrundqualität und kann zu komplexen Grundwasserverhältnissen führen.

Abb. 5e: Stratigraphische, lithologische, hydrogeologische und baugrundgeologische Charakterisierung der Schichtfolge in Ludwigsburg

Alle Angaben sind Durchschnittswerte ohne Gewähr und ersetzen keine spezifischen Untersuchungen bei einzelnen Bauvorhaben.

Kurzzeichen Alter	Schichtprofil	Geologisch lithostratigraphische Einheiten	Mächtigkeit	Lithologische Charakterisierung	Hydrogeologische Charakterisierung <i>Alle Angaben sind Durchschnittswerte.</i>	Baugrundgeologische Charakterisierung <i>Bei Bauvorhaben und bei Grundwasserbohrungen können Abweichungen vorkommen.</i>
y, q, L hier 0-0,9 Ma	Deckschichten	Auffüllungen und Quartär können je nach den morphologischen Verhältnissen über allen Grundsichten liegen.	Auffüllung 0 - bis > 5 m	Auffüllung: Schutt, Steine, sandige Lehme, Blöcke, z.T. mit Müllresten, Schadstoffe.	Porengrundwasserleiter (Lockergesteins-Grundwasserleiter). Je nach Tonanteil Grundwasser-Geringleiter. Geringe, selten mittlere Ergiebigkeit. Kopplung mit Gipskeuper und Lettenkeuper. Gespannte Grundwasserverhältnisse sind möglich.	Auffüllungen: Oft heterogene und gering verdichtete Zusammensetzung. Setzungsempfindlich und wenig tragfähig, oft Müll und Schadstoffe. Als Baugrund selten geeignet.
kmSt ~229,5 - 231 Ma		Normalfazies Rinnenfazies Normalfazies Esterienschichten	Quartär diskordant über allen Grundsichten vorkommend. Quartär: Flächen: Lösslehm, Löss, org. Tallehm; Schluff und Lehm, z.T. sandig, tonig. Hang: Fließerden, Abschwemmmassen, Hangschutt, Schluff und Ton, sandig bis steinig. Hangfuß: Schluff und Ton, sandig, kiesig, steinig, Steinblöcke. Talauen: Schluffig-sandige Lehme, Tone, teils organisch, sandige Kiese, Schlicklinsen, Steinblöcke.	Auf der Kuppe des Lembergs bis ca. 25 m.	Quartär: Lösslehm, Löss: Ab steifer Konsistenz durchschnittlicher Baugrund. Kritisch im Grundwasser. Die Lehme sind sehr frostempfindlich und schrumpfempfindlich. Fließerden: Ab steifer Konsistenz durchschnittlicher Baugrund. Hanglehm: Bei steifer Konsistenz durchschnittlicher Baugrund. Hangschutt: Bei hohem Steinanteil und ab steifer Konsistenz des Zwischenmittels durchschnittlicher bis günstiger Baugrund. <u>Auenlehm, Bachablagerungen, Talkiese:</u> Auenlehme und Bachablagerungen sind meistens ein ungünstiger Baugrund. Die Neckarkiese sind durchschnittlich bis günstig, hier können aber weiche Schlicklinsen auftreten! Hochwassergefahr beachten!	
kmGr 233 – 237,5 Ma	Grundsichten	Anatinabank Acrodus-Corbula Horizont Mittlerer Gipshorizont Bleiglanzbank Dunkelrote Mergel Bochinger Horizont Bochinger Bank Grundgips- schichten *	Schliff- sandstein Stuttgart-Formation Gipskeuper Grabfeld-Formation	Im Bereich des Lembergs bis ca. 100 m. Die Sulfate sind oberflächennah oft ausgelauft. Flutfazies: Feinkörniger roter, graugrüner und oft gut gebankerter Sandstein. Normalfazies: Ton- und Siltsteine mit Feinsandlagen.	Im unausgelaugten Bereich Kluftgrundwasserleiter mit geringer, selten höherer Grundwasserführung. Im ausgelaugten Bereich Kluft- und Porengrundwasserleiter auch mit höherer Grundwasserführung. Geringe GW-Führung in aufgewitterten Tonhorizonten.	Quartär: Kluftgrundwasserleiter (Festgestein-Grundwasserleiter) mit geringer Wasserführung. In Ludwigsburg ohne Bedeutung.
kuE 237,5- 241 Ma		Grenzdolomit Grüne Mergel Lingula Schichten** Anoplophora-Sch. Anthronitbank Hauptsandstein Esterienschichten Basischichten	Letten- keuper Erfurt-Formation	Je nach Abtragung 0 - 23 m.	Enge Wechselfolge von veränderlich festen graugrünen Ton- und Schluffsteinen und geklüfteten, grauen Dolomitsteinbänken, gelbgrauer Hauptsandstein. ** Die Lingula-Schichten sind örtlich durch den fossilreichen Hohenecker Kalk (recalcitranter Dolomit) vertreten.	Kluftgrundwasserleiter mit schichtiger Gliederung. Geringe bis mittlere, selten hohe Ergiebigkeit. In früherer Zeit Wasserversorgung von Ludwigsburg. Notwasserbrunnen in Poppenweiler, Kopplung mit den quartären Deckschichten.
mo... ...D ...M ...TK 241 – 242,4 Ma		Trigonodusdolomit (Rottweil-Formation) Oberer Hauptmuschelkalk (Meißner-Formation)	Oberer Muschelkalk Rottweil-Formation, Meißner F., Trochitenkalk F.	Im Neckartal unter den Auensedimenten ca. 10 – 12 m, auf der Gäufläche je nach Abtragung bis maximal ca. 88 m.	Trigonodusdolomit (5 - 10 m): Gelbgrauer und dickbankiger, oft klüfig-kavernöser und auch verkarsteter Dolomitstein und dolomitischer Kalkstein. Hauptmuschelkalk: Graugelbe bis blaugraue und dunkelgraue, teils mikrokristalline, teils bioklastische und oft gut gebankte Kalksteinbänke (Schalentrümmerkalke). Oft mit versteinerten Resten von Lebewesen, z.B. Ammoniten und Seelilienstielglieder etc. Teils verkarstet. Teils dickbankig, teils dünnbankig, plattig. Getrennt und gegliedert durch dünne und dunkle Mergel- und Tonsteinlagen.	Kluftgrundwasserleiter mit verkarsteten Bereichen. Oft schwedende GW-Horizonte über Tonmergelsteinen. Kopplung mit den Oberen Dolomiten des Mittleren Muschelkalks und mit dem Grundwasser in den Kiesen im Neckartal. Im Bereich der Haßmersheimer Schichten eingeschränkte Stockwerksverbindung. Geringe, oft mittlere und örtlich hohe Ergiebigkeit. Fassung der Notwasserversorgung und Wasserversorgung des Freibades. Mineralwasserbrunnen in Hoheneck im Neckartal. Der Solebrunnen in Hoheneck wird vom tieferliegenden Buntsandstein gespeist.
		Unterer Hauptmuschelkalk (Trochitenkalk- Formation)				Schwach geklüftet, gering - mäßig verwittert: Günstiger Baugrund. Mehrkosten beim Lösen von Fels möglich (Bodenklassen 6 - 7 - alte DIN 18300). Deutlich geklüftet, verwittert und gering verkarstet: Durchschnittlicher Baugrund Stark verwittert, entfestigt und geklüftet, stark verkarstet mit Spaltenbildung: Ungünstiger Baugrund.
		Haßmersheimer Sch.				In den Gauen und in Ludwigsburg gibt es örtlich Erdfälle und andere Karsterscheinungen durch Auslaugungsvorgänge im Oberen und Mittleren Muschelkalk. Weitere Erdfälle können jederzeit auftreten.

Abb. 5f: Baugrundqualität im Raum Ludwigsburg

Ohne Gewähr! Im Gelände können Abweichungen vorkommen. Es ist immer eine fachliche Untersuchung und Beurteilung erforderlich.

Überwiegend günstiger Baugrund

Regelmäßiger Schichtaufbau mit einheitlich guter Tragfähigkeit und geringer Setzungsfähigkeit und Verformbarkeit der Schichtglieder. Gemischtkörnige Böden mit Steingerüst und **mindestens halbfester Konsistenz** des Zwischenmittels. Kein Grundwasser in der Baugrube. Sickerwasser ist möglich. Bei Fels sind erhöhte Aushubkosten möglich.

Beispiele

- Hanglehm und -schutt, Fließerde, Tal-(Wander)schutt mit dichtem Steingerüst (Zwischenmittel st – hf).
- Lehmarme Kiese ohne Schlicklinsen, Hochwassergefahr in Tallagen beachten!
- Frischer bis mäßig verwitterter Gipskeuper (V0 - V2).
- Frischer bis mäßig verwitterter, aber teils veränderlich fester Lettenkeuper (V0 - V2). (1)
- Gering geklüfteter und gering bis mäßig verwitterter Oberer Muschelkalk. (2)

Überwiegend durchschnittlicher Baugrund

Teilweise unregelmäßiger Schichtaufbau, überwiegend mittlerer bis guter Tragfähigkeit, mäßiger Setzungsfähigkeit und Verformbarkeit der Schichtglieder. Fein- bis gemischtkörnige Böden von **mindestens steifer Konsistenz**, bei hohen Lasten **mindestens halbfest!** Verwitterung und Klüftung sind möglich. Grund- und Sickerwasser in der Baugrube sind möglich. Bei Fels sind erhöhte Aushubkosten möglich. * Verwitterter Gipskeuper ist oft stark kompressibel.

Beispiele

- Einbaumaterial (homogene und verdichtete Auffüllung – teilweise brauchbar, Schadstoffe beachten!).
- Auenlehme, Bachablagerungen (st – hf), Quellen, Schrumpfen und Hochwassergefahr beachten!
- Fließerden, Hanglehm, Hang- und Talschutt als zusammenhängende Decken am Hangfuß (st – hf).
- Löss und eingeschränkt Lösslehm außerhalb des Grund/Stauwassers, mindestens (st – hf).
- Verwitterter und ausgelaugter Gipskeuper* ohne/mit Hohlraumbildung und verwitterter Lettenkeuper (V3)
- Geklüfteter und schwach entfestigter Oberer Muschelkalk.

Überwiegend ungünstiger bis unbrauchbarer Baugrund

Stark unterschiedlicher Schichtaufbau mit geringer Tragfähigkeit. Starke Setzungsfähigkeit und Verformbarkeit der Schichtglieder. Grundwasser in der Baugrube ist möglich. Sehr starke Verwitterung, Entfestigung und Verkarstung, Hohlräume. Starkes Quellen und Schrumpfen bei jahreszeitlichen Wassergehaltsänderungen, Bodenbildung (V4 - V5). Bindige Böden mit **weicher bis breiiger Konsistenz** sind unbrauchbar.

Beispiele

- Inhomogene, oft lehmig-steinige und gering verdichtete Auffüllungen (als Baugrund unbrauchbar).
- Lösssedimente im Grundwasser oder im Schwankungsbereich oder mit Stauwasserhorizonten.
- Lösssedimente mit engräumig wechselnder Zusammensetzung und Konsistenz.
- Weicher Hang-, Talschutt und Tallehm ohne Steingerüst, als Baugrund oft unbrauchbar.
- Weiche und kompressible Auenlehme, Schwemmlehme, Bachablagerungen (stark kompressibel, oft unbrauchbar), Hochwasser!
- Stark organische Böden, Torf, Schlick (unbrauchbar), Schlicklinsen.
- Verwitterter, plastifizierter und ausgelaugter tonig-schluffiger Gipskeuper mit Hohlraumbildung und/oder im Grundwasser. An Talhängen und an Hängen im Gipskeuper sind Rutschungen möglich (V3 – V5).
- Quell- und schrumpfempfindliche Tone im Keuper und im Quartär.
- Anhydrit (Quellung und Sohlhebung) und Gips (Auslaugung, Hohlraumbildung).
- Tief verwitterte und zersetzte Ton- Mergel- und Schluffsteine des veränderlich festen Lettenkeupers, v.a. im Hangbereich (V3 – V5).
- Stark geklüfteter, verwitterter, entfestigter und weggelöster Oberer Muschelkalk mit Spaltenbildung (V3, V4).
- Bereiche mit Erdfällen, größeren Spalten und größeren Lösungshohlräumen (unbrauchbar).
- Bituminöse und pyritführende Tongesteine, Gefahr von Baugrundhebung bei Austrocknung.

Verwitterungsstufen der Festgesteine nach Wallrauch 1969:

V0 = unverwittert, V1 = angewittert, aufgewittert, V2 = mäßig verwittert/mäßig entfestigt, V3 = stark verwittert/entfestigt,

V4 = vollständig verwittert/zersetzt - Lockergestein, V5 = zersetzt, Bodenbildung, st-hf = steif bis halbfest

(1) Bei Karbonat- und Sandsteinbänken oft Bodenklasse 5 - 6, sehr selten 7 nach der „alten DIN 18300“

(2) Nicht aufgelockert oft Bodenklasse 6 - 7, Reiß- und Meißelarbeiten können erforderlich sein.

* Verwitterter Gipskeuper kann tragfähig sein, ist aber oft stark kompressibel.

3.2 Deckschichten (Quartär: Pleistozän, Holozän, im Bereich Ludwigsburg etwa 1 Ma bis heute)

Auf den Erosionsflächen des sich aus dem schwach geneigten Tafeldeckgebirge entwickelnden Schichtstufenlandes, in Ludwigsburg Oberer Muschelkalk, Lettenkeuper und Gipskeuper, wurden während der Kaltzeiten vor 2,6 Mio. Jahren einige Dezimeter bis mehrere Meter mächtige Lockersedimente als sogenannte Deckschichten auf den viel älteren, erodierten und angewitterten Grundschichten diskordant (im Winkel) abgelagert. Diese bedecken und formen heute viele Landschaftsoberflächen in Baden-Württemberg (Abb. 6). Erhalten geblieben sind im Raum Ludwigsburg bis heute v.a. die Ablagerungen und die Abtragungsreste der Riß- und der Würm-Kaltzeit und vereinzelte Reste älterer Kaltzeiten. Weite Bereiche der Landschaftsoberfläche von Strohgäu und Langem Feld werden von feinkörnigen, teils gemischtkörnigen und bindigen **Deckschichtensedimenten** mit Mächtigkeiten von weniger als 1 m, oft 2 bis 6 m und in Ludwigsburg mit örtlich bis zu 18 m gebildet. Daher werden viele Bauwerke in diesen nicht vorkonsolidiert, mehr oder weniger wasserempfindlichen, setzungsempfindlichen, frostempfindlichen und bindig kompressiblen Schichten gegründet oder auf oft felsartigen Grundschichten durchgegründet. In Abhängigkeit von der jahreszeitlich unterschiedlich starken Durchfeuchtung neigen diese Schichten auch zum Schrumpfen und Quellen (Abb. 5f) und **eine Gründung kann hier anspruchsvoll sein**. Die Deckschichten bestehen oft aus 0,5 bis über 2 m mächtigem, gelb-rostbraunem, tonigem und kalkfreiem Lösslehm über grau-fahlgelbem, schluffigem und kalkhaltigem Löss und stellenweise aus lössführenden Fließerden. Die Baugrundverhältnisse in den Lösssedimenten können über größere Flächen und Tiefen einigermaßen einheitlich, aber auch sehr uneinheitlich sein und schnell wechseln. Gelegentlich wechseln die Konsistenzen innerhalb von wenigen Metern, was aufwendigere Erkundungen und Gründungsmaßnahmen erforderlich machen kann. Vermischt mit den Deckschichten befinden sich am Übergang zu den Grundschichten oft deren umgelagerter, bräunlicher und kiesig-lehmiger Frost- und Verwitterungsschutt. Auf den flachwelligen Gäuflächen haben sich schon bei geringer Hangneigung feinkörnige und teils steinige Fließerden gebildet. Die Abhängen zu den flacheren Tälern sind mit Hanglehm, die zu den steilen Talflanken sind mit lehmig-steinigem Hangschutt bedeckt. In flachen Tälchen und in Senken findet man tonig-schluffige und z.T. kiesige Abschwemmmassen und Auensedimente, oft mit organischen Beimengungen. Die größeren Flusstäler sind mit sandigen Kiesen mit vereinzelten Schlicklinsen und mit anthropogenen Abschwemmlehm aus der Würm-Kaltzeit und aus der aktuellen Holozän-Zeit gefüllt. In Abbildung 12a ist die Kornverteilung typischer Lockergesteinsproben dargestellt. **In Beilage 10 und in der Baugrundkarte in Kap. 8 sind auffallende Mächtigkeitsschwankungen dieser Deckschichten verzeichnet.**

3.2.1 Löss und Lösslehm

Das Staubsediment **Löss** (schwäb.-elsässische Mundart *lösch* = *locker*) wurde während der vergangenen Kaltzeiten durch beständig wehende Südwestwinde aus den vegetationsarmen und oft trockenen Schotterflächen des Oberrheingrabens verfrachtet und mit nachlassender Windgeschwindigkeit auf den grasbewachsenen Steppen und Tundraflächen der Gäue, oft auch in Windschattenlagen und in Muldenlagen abgelagert. Mächtige Lössbedeckungen findet man heute vor allem auf damals bewuchstragende Verebnungsflächen unterhalb der damaligen Schneegrenze von 500 m, die in der Nacheiszeit wenig abgetragen wurden. Löss ist ein sehr gleichkörniges ($U = 2,5$), oft poröses und zerreibbares Sediment in der Feinschluff- und v.a. in der Mittel- und Grobschlufffraktion (0,002 - 0,006 - 0,063 mm) mit breit streuenden Ton- und Feinsandanteilen (Abb. 12a). Löss besteht aus 60 - 80 % Quarz mit Anteilen von 10 - 20 % Feldspat und anderen Mineralen und ist mit bis zu 30 % Kalk schwach verkittet. Der Porenraumanteil beträgt bis zu 55 % und der Haftwasseranteil 30 bis 40 %. Auffallend sind oft kleine Schneckschalen. Durch die Ablagerung der Staubkörner zwischen den Grashalmen auf den weitflächigen Tundren und Kältesteppen (Mammutsteppe) hat sich im unverwitterten Löss eine senkrecht-haarröhrenförmigen Textur erhalten, die drainierend und stabilisierend wirkt. Zusammen mit dem mechanisch guten Zusammenhalt der kantigen Lösskörner und der sekundären Kalkzementation führt das zu einer hohen Standfestigkeit auch von steilen und senkrechten Lösswänden in trockenem Zustand. Ein Beispiel in Ludwigsburg ist hier die Lechtsteige in Neckarweihingen. Der nicht vorkonsolidierte, locker gelagerte, grau-fahlgelbe und oft steife bis halbfeste Löss ist an der Oberfläche fast immer 0,5 bis 2 m tief zu dichter gelagertem, feuchterem und gelb-rostbraunem **Lösslehm** mit oft steifer Konsistenz verwittert. Im Grundwasser- und Staunässerbereich wird auch fahlgrauer, weicher bis breiiger Lösslehm und umgelagerter und ungleichkörniger **Schwemmlöss** angetroffen. Bei der Verwitterung von Löss wird der Kalk durch das Niederschlagswasser gelöst und abgeführt und die gute Kornbindung durch Verkittung geht verloren. Die Eisenanteile der Minerale werden zu braun-rötlichem Eisenhydroxid oxidiert und umhüllen als dünne Häutchen die feinen Mineralkörper. Durch Tonmineral-Neubildung aus Feldspäten und anderen Silikaten entstehen feinere Kornanteile (Feinsand-Schluffgemisch → Feinsand-Schluff-Tongemisch). Der Lösslehm wird durch den erhöhten Tongehalt (bis 30 %) plastisch und die Porosität nimmt ab. Damit verschlechtern sich die bodenmechanischen Eigenschaften des ursprünglich recht standfesten Lusses und es besteht die Gefahr von Setzungen und Hebungen aufgrund von jahreszeitlichen Volumenänderungen. Löss und Lösslehm haben bei steifer bis halbfester Konsistenz eine mittlere bis gute Tragfähigkeit, sind aber kompressibel, sackungs- und setzungsempfindlich und gelten als durchschnittlicher Baugrund. Bei großen Punktlasten, bei setzungsempfindlichen Bauwerken oder bei einem engräumigen Wechsel der Bodeneigenschaften ist aber ein Durchgründen auf die festeren Grundschichten zu empfehlen. Der plastische Lösslehm hat bei weicher Konsistenz eine geringe Tragfähigkeit und ist dann ein ungünstiger Baugrund. Beim Baugrubenaushub sind die Lösssedimente relativ gut lösbar. Die Baugrundeigenschaften von Löss und Lösslehm sind stark vom Wassergehalt und von der Lagerungsdichte abhängig. Problematisch kann eine große Sackungsempfindlichkeit, v.a. der oberen 2 – 4 m, z.B. beim Wiederanstieg von Grundwasser sein. Schon eine geringe zusätzliche Durchnässung kann zur Verschlammung führen. Bei Wassersättigung kann es im Löss durch Kalklösung zum plötzlichen Gefügezusammenbruch und damit zum Verlust der Festigkeit kommen. Infolge der hohen Porosität und durch die leichte Mobilisierbarkeit der Schluffkörper ist Löss stark erosions-, suffusions- und subrosionsanfällig. Das kann unter Kiesschichten des Straßenkoffers, bei undichten Regenfallrohren und bei schlecht ausgeführten Drainagen zu schlotartigen Ausspülungen und zu

Senkungen führen. Feuchter Lösslehm kommt leicht ins Quellen und Rutschen und ausgetrockneter Lösslehm schrumpft und zerfällt in kleine Stücke. Bei Wasserzutritt, z.B. durch im Lösslehm oft auftretende weiche bis breiige Stauhorizonte oder in schlecht entwässerten Baugruben, bekommt auch unverwitterter Löss rasch eine weiche bis breiige Konsistenz und kann dann große Bauprobleme verursachen. Schon in erdfeuchtem Zustand kann Löss schwer verdichtbar sein. Kritisch sind diese Schichten auch wenn sie im Grundwasserbereich angeschnitten werden. Dies traf bei einigen Bauvorhaben im Stadtteil Grünbühl zu und führte dort zu erheblichen Mehrtiefen. Wasserzutritt in der Baugrube ist daher unbedingt zu vermeiden. Lösslehm wird bei stärkerem Wasserzutritt rutschempfindlich und Lösssedimente sind auch sehr frostempfindlich. Die **Abdichtung** von Bauwerken in Lösssedimenten sind daher besonders sorgfältig auszuführen und eine dauerhafte Dränung mit Ableitung wird i.d.R. nicht genehmigt. Die dynamische Belastbarkeit von Lösslehm und Löss hat enge Grenzen. Werden dort dynamische Lasten, z.B. von Maschinenfundamenten (Vibrationsprüfstationen, Pressen, Kompressoren, Hammerwerke etc.) eingeleitet, kann es im Gebäude und auch in benachbarten Gebäuden zu Bodenschwingungen und Lärmbelästigungen kommen, die nicht hinnehmbar sind. Auch kann der feuchte oder bei Regen durchnässte Lösslehm sich setzen oder ins Fließen kommen. In diesem Fall sind Maschinenfundamente normgerecht mit geeigneten technischen Maßnahmen entkoppelt auszuführen, z.B. durch mechanische oder/und elastische Schwingungsdämpfer, durch Spezialbeton oder durch Bodenaustausch, Bodenverbesserung mit Harzinjektionen oder durch eine Tiefergründung. Beim Straßen- und Kanalbau müssen Lösssedimente zur Verdichtung oft durch Bodenverbesserung stabilisiert werden (Kalkung, Einarbeitung von Grobschotter). Bei Flachgründungen in bindigen Schichten müssen die Bauwerke wegen der Gefahr des Quellens und Schrumpfens des Bodens, wegen möglicher größerer Setzungen und wegen der Frostempfindlichkeit ausreichend tief gegründet und geschützt werden. Die Austrocknung oder Durchfrierung kann örtlich bis zu 2 Meter betragen. Nahe der Gründung dürfen keine stark wasserabsorbierenden Bäume gepflanzt werden. Im Raum Ludwigsburg tragen die nach Norden und Nordosten exponierten Hänge oft eine mächtige Lössdecke (Windschatten), während an den Gegenhängen die Schichten des Muschelkalks bis einschließlich Gipskeuper häufig zu Tage ausstreichen. Eine Ausnahme bildet der nach Süden exponierte Neckarhang am Ostrand von Neckarweihingen. Dort kam es auf einer Höhe von etwa 240 bis 250 m ü. NN zur Ablagerung von über 14 m mächtigem Lösslehm, Löss und Fließerde. Alle ehemaligen Ziegeleigruben auf städtischer Markung befinden sich an Nord- bzw. Nordosthängen oder in den Übergangsbereichen zu den ebenen Hochflächen der Gäulandschaften. Die Bodenbildung aus den Lösssedimenten ist im Raum Ludwigsburg oft eine fruchtbare Parabraunerde.

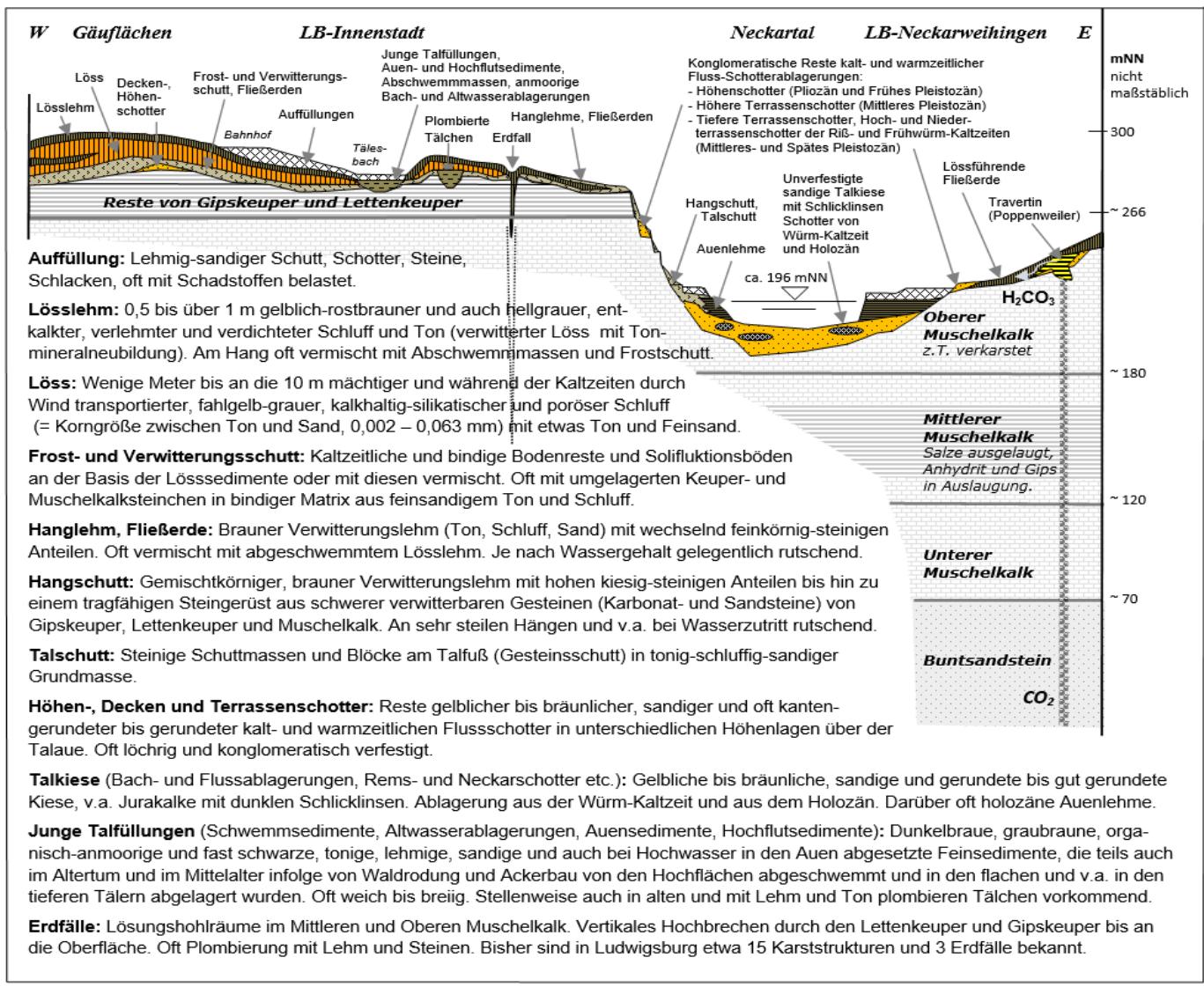


Abb. 6: Profilschnitt der quartären Deckschichten auf den Gäuflächen, in Hangbereichen und im Neckartal (schematisch und überhöht)

3.2.2 Frostschutt, Fließerden, Hangschutt, Talschutt

Während der Kaltzeiten im Pleistozän waren die Böden bis zu 100 m tief gefroren (Permafrost) und sind nur in den kurzen Sommern an der Oberfläche zu wassergesättigten Gels(Soli)fluktionsböden aufgetaut. Durch die dann täglichen Frost-Tauwechsel wurden die festen bis harten und auch tonig-mergeligen Gesteine der Grundsichten schnell verwittert, plastisch entfestigt und steinig durchmischt (Kryoturbation). Heute befinden sich am Übergang zu den Grundsichten und mit diesen vermischt oft **Frost- und Verwitterungsschutt** und schon an gering geneigten Hängen haben sich, v.a. bei sommerlicher Wassersättigung, rutschempfindliche **Fließerden**, **lössführende Fließerden** und **Hanglehme** gebildet (Gelifluktion). Diese Bildungen bestehen aus umgelagertem, feinsandigem Lehm und tonigem Schluff mit einem stark wechselnden und oft kantigen Stein- und Grusanteil im Fein- und Mittelkiesbereich. Die bei steifer bis halbfester Konsistenz durchschnittlichen Baugrundeigenschaften dieser Böden werden aber noch durch die bindige Matrix bestimmt und je höher der Steinanteil ist, desto besser ist der Baugrund. An vielen steileren Abhängen, v.a. am Neckartal und am Südhang des Tälesbachs, findet man unterschiedlich mächtige **Hangschuttdecken** mit einem engräumig wechselnden und oft höheren Steinanteil in der lehmigen Grundmasse. In Richtung Hangfuß nimmt die Mächtigkeit des steinreichen Hangschutts zu. Bei einem hohen Stein- und Kiesanteilen kann hier ein tragfähiges Steingerüst ausgebildet sein, das die bodenmechanischen Eigenschaften maßgeblich mitbestimmt. Bei mindestens steifer Konsistenz der bindigen Matrix kann der kantige Hangschutt als durchschnittlicher Baugrund und beim Vorhandensein eines Steingerüsts und halbfester Konsistenz auch als günstiger Baugrund eingestuft werden. An den sehr steilen Prallhängen des Neckartals kriechen die Hangschuttmassen infolge der Schwerkraft oft langsam bergab, was man gut am säbelartigen Wuchs vieler Bäume erkennen kann. Hier besteht Rutsch-, Steinschlag- und auch Baumschlaggefahr, z.B. entlang dem Otto-Konz-Weg, und der Baugrund ist kaum brauchbar. Hangschutt, der bis in die Talböden reicht wird **Talschutt** genannt. Diese oft groben eiszeitlichen Schuttmassen wurden durch Bodenfließen und Rutschungen in die Täler transportiert. Talschutt ist ein durchschnittlicher und bei Ausbildung eines Steingerüsts und bei steifer Konsistenz auch ein günstiger Baugrund.

3.2.3 Junge Talfüllungen, Abschwemmmassen, Talauen

Auf der Ludwigsburger Markung gibt es **5 größere Bachläufe und zahlreiche kleine Tälchen**, die mit unterschiedlich mächtigen "Jungen Talfüllungen" (Auensedimente, Hochflutsedimente, Altwasserablagerungen, Bach- und Schwemmablagerungen) gefüllt sind (Abb. 4). Es sind dies der **Tälesbach**, der von der Innenstadt zum Neckartal verläuft, der **Gründelbach mit Riedgraben** und **Monrepossee** bei Eglosheim, der **Furtbach (Leudelsbach)** bei Pflugfelden, der **Zipfelbach**, der südlich von Poppenweiler in den Neckar mündet und der **Riedbach** bzw. **Lochwaldgraben** zwischen Salonwald, Oßweil und Neckartal. Weitere Bach- und Schwemmablagerungen findet man im kurzen **Ölmühlenbach** nördlich von Hoheneck, im **Trockentälchen** zwischen Favoritepark und dem Heilbad Hoheneck, im **Ried** und beim **Teich am Nord- und Ostrand von Poppenweiler**, im **Tälchen des Mühlbachs** zwischen Altem Friedhof, Kreiskrankenhaus und Blühendem Barock und im **Frauenriedbach** am Südostrand von Grünbühl. Beim Erweiterungsbau des Kreiskrankenhauses 1993/94 wurden im Bereich des Mühlbachs 5 - 8 m mächtige, weiche und lehmige Talablagerungen mit flachem Grundwasserstand angetroffen (Badgartenbrunnen). Dort kam es bei der Gebäudegründung mit Verbauträgern zu einer unvorhergesehenen Ableitung des mit LHKW verunreinigten Grundwassers vom Lettenkeuper in den Oberen Muschelkalk. Hohe Sanierungskosten waren die Folge. Die stark bindigen Abschwemmmassen, Bachsedimente und die Auenlehme bestehen aus gelegentlich steifen und oft weichen bis breiigen Lehmen und Tonen mit wechselnden Sand- und Kiesanteilen (abgeschwemmter Lösslehm mit Keupermaterial). Sie haben eine geringe Tragfähigkeit und eine hohe Frost- und Setzungsempfindlichkeit. Wegen ihrer ungünstigen Baugrundeigenschaften sind sie für eine Gründung oft wenig geeignet. Die Verbreitung der größeren Bachablagerungen wurde in der Baugrundkarte durch Punktrasterung hervorgehoben. Im Zuge der geologischen Bearbeitung der Baugrundkarte konnten in Ludwigsburg drei bisher unbekannte und wesentlich ältere Tälchen nachgewiesen werden, die mit hochplastischen und kalkfreien Tonen plombiert sind. Zwei dieser **plombierten Tälchen im Bereich Kulturzentrum und nördlich der Schlösslesfeld-Schule** haben ein schwaches, nach Norden gerichtetes Gefälle. Ein weiteres **plombiertes Tälchen verläuft in östlicher Richtung im Bereich der Wernerstraße**. Hier wurden bis zu 18 m mächtige und bindige Deckschichten mit Torfeinschlüssen nachgewiesen. Mit weiteren alten Talablagerungen dieser Art ist zu rechnen (siehe Beilage 16 und Karte in Kap. 8). Der **Tälesbach** in der Innenstadt verläuft vom Hohenzollernplatz in nördlicher und dann in zahlreichen Bögen unter der Abel- und Marbacher Straße in nordöstlicher Richtung zum Neckar und ist heute vollständig kanalisiert. Im Talbereich zwischen Leonberger Straße, Seestraße, Wilhelmstraße und Gartenstraße war zur Gründungszeit von Ludwigsburg eine Anzahl von Teichen für die Fischzucht angelegt. Bis Anfang des 20. Jahrhunderts ist davon der Feuersee übriggeblieben, auf dessen aufgeschüttetem Areal später das Schiller- und das Mörikegymnasium gebaut wurden. Die Ablagerungen des Tälesbachs bestehen aus überwiegend bindigen Abschwemmmassen, in denen lagenweise organische Reste (Schlick und untergeordnet Torf) eingeschlossen sind. Die einschließlich der künstlichen Auffüllung bis maximal 9 m mächtigen Lockergesteine sind im Oberlauf, etwa bis zur Wilhelmstraße, schwach grundwasserführend. Der unterlagernde Gipskeuper bzw. Lettenkeuper wirkt hier als Grundwassersohlschicht. Die Bachablagerungen sind oft von weicher, örtlich sogar breiiger Konsistenz und stellen einen besonders ungünstigen Baugrund dar. Zahlreiche größere Bauwerke stehen daher auf Pfählen, die in der Regel bis 2 m tief in den Lettenkeuper einbinden (Schiller- und Mörikegymnasium auf Holzpfählen). Etwa ab der Ecke Garten-Wilhelmstraße schneidet der Tälesbach in den klüftigen Oberen Muschelkalk ein. Hier versickert das Talgrundwasser teilweise. Etwas günstigere Baugrundverhältnisse sind die Folge. Der **Gründelbach mit Riedgraben** und der **Furtbach** bei Eglosheim schneiden in den untersten Gipskeuper und in den Oberen Lettenkeuper ein. Die organischen und bindig-kompressiblen Bachablagerungen erreichen hier Mächtigkeiten von 4 bis 6 m. Typisch sind Lagen mit schwarz gefärbten, schwach organischen Tonen, sog. Sumpfton. Abschnittsweise muss mit erheblicher Wasserführung im Grenzbereich Talfüllung/Lettenkeuper gerechnet werden. Es herrschen auch schwach gespannte Druckverhältnisse, z.B. im

Brunnen Altach. Der **Zipfelbach** und der **Ölmühlenbach** haben an ihren Einmündungen in den Neckar breite, flache und kiesig-sandige Schwemmfächer abgelagert. An vielen Bächen, z.B. am Ölmühlenbach nördlich von Hoheneck, findet man poröse und mit Pflanzenresten durchsetzte Quellkalkablagerungen (Kalktuffe), die dort bis heute abgelagert werden. Informationen zum Oberboden (Humus etc.) gibt es in der Broschüre "Geologie in Ludwigsburg, 3.5.2 Böden in Ludwigsburg".

3.2.4 Ablagerungen des Neckars

Nach den bekannten Aufschlüssen sind die Baugrundverhältnisse in der Neckartalaue recht einheitlich. Im ungestörten Verband folgen unter dem Mutterboden und einer eventuellen Auffüllung etwa 2 bis 6 m mächtige, braune und anthropogene **Auenlehme**, oft gefolgt von einer bis über 3 m mächtigen **Feinsandlage** und 3 bis 5 m mächtigen sandig-schluffigen **Talkiesen**. Bei den wenig- bis unkonsolidierten und kompressiblen **Auenlehmen** handelt es sich um wechselnd feinsandige und kiesige, meist schwach tonige Schluffe, deren Konsistenz in der Regel zur Tiefe ungünstiger wird (steif → weich). Organische Beimengungen (Schlick oder Torf) wurden nur örtlich begrenzt im Übergangsbereich zum Kiessand angetroffen. Die Auenlehme wurden zu einem großen Teil im Altertum und im Mittelalter bei Starkregenereignissen als Hochflutlehme angeschwemmt und abgelagert, als die Böden der Gäuflächen durch großflächige Waldrodung und unsachgemäßen Ackerbau stark erodiert wurden, z.B. bei der verheerenden Magdalenenflut im Juli 1342. Im Übergangsbereich zu den Talkiesen treten Sande mit wechselnden Kies- und Feinkornanteilen auf. Unter den Lehmen und Sanden folgen sandige und wenig gerundete **Talkiese**, die an ihrer Basis häufig grobe Kiese und Steinblöcke enthalten. Über der Grundwasseroberfläche sind die Kiese stark verlehmmt. Kiesabbau wurde im Ludwigsburger Neckartal bei Neckarweihingen und bei Poppenweiler im Bereich der heutigen Mühläckerstraße, Humboldtstraße und Philip-Reis-Straße betrieben. Die Gruben wurden anschließend mit z.T. schadstoffhaltigem Schutt verfüllt und mit einem Gewerbegebiet überbaut. Verschiedene Eingriffe in die natürlichen Verhältnisse erfolgten auch im Zuge der Neckarkanalisierung an der Einmündung des Zipfelbachs, an der Staustufe Poppenweiler und bei angrenzenden Straßenbaumaßnahmen. Die Auenlehme und die Sande im Übergangsbereich sind als Baugrund nur für wenig setzungsempfindliche Bauwerke geeignet. Größere Lasten werden in der Regel auf den Neckarkies oder in Ausnahmefällen auf den unterlagernden Oberen Muschelkalk abgetragen. Die Verformungseigenschaften der Neckarkiese ist vom Anteil der bindigen Gemengeanteile ($\leq 0,063$ mm) abhängig (Korngerüst vorhanden). Kiese mit $\leq 15\%$ bindige Anteile (Feinkorn) und Auenlehme ab steifer Konsistenz haben günstige bzw. durchschnittliche Baugrundeigenschaften.

Bei Baugrunduntersuchungen im Bereich der Neckaraue südlich von Hoheneck waren die Neckarschotter wie folgt zusammengesetzt:

• Feinkorn (Ton und Schluff)	7 Gew.%	Die oft plattig-gerundeten bis gerundeten Kiese bestehen aus Weißjura-Kalksteinen und untergeordnet aus Muschelkalksteinen und Sandsteinen.
• Sand	23 %	Die Durchlässigkeit liegt bei ca. 2×10^{-4} m/s. Abweichungen sind möglich.
• Feinkies	15 %	Die Kornverteilung der Neckarschotter ist in Abb. 12a dargestellt.
• Mittelkies	22 %	
• Grobkies	27 %	
• Steinanteil	6 %	

Vor dem pleistozänen Eiszeitalter vor 2,6 Ma flossen der Ur-Neckar und seine Nebenflüsse im Vergleich zu heute in jüngeren und damit höher liegenden geologischen Grundsichten. Die breiten Flüsse haben sich infolge der rhythmischen Hebung des Landes ab der Oligozän-Zeit vor etwa 30 Mio. Jahren immer tiefer in die Gesteinsschichten eingeschnitten und bis heute oft tiefe Täler erodiert. Man nimmt an, dass während der Kaltzeiten, also in den vergangenen 2,6 Mio. Jahren, im Strohgäu bis zu 50 m Gesteinsschichten abgetragen wurden und sich der Neckar um bis zu 80 m eingetieft hat. Auf den Höhen und an den Talflanken habe die Flüsse kiesig-sandige Ablagerungen hinterlassen. Durch das Einschneiden der Flüsse in den sich langsam hebenden Untergrund wurden die Talsohlen immer tiefer gelegt und die älteren Schotterablagerungen wurden dabei großteils erodiert. Die Reste dieser ineinander geschachtelten Schotter werden heute bei Bauvorhaben in den Hangbereichen angetroffen (Beilage 6). Diese oft zu löchrigen Konglomeraten verfestigten, sogenannten **Höhenschotter**, **Höhere Terrassenschotter** und **Hochterrassenschotter** hat man auf der Gäufläche bei Oßweil (Höhenschotter 100 m über der heutigen Neckaraue), im Neckartal nördlich und nordöstlich von Neckarweihingen, im Bereich von Hoheneck, an der Straße von Poppenweiler nach Hochdorf (mit Travertin) und im oberen und mittleren Bereich des ehemaligen Steinbruchs Hubele am Rand des Neckartals gefunden. Nördlich von Neckarweihingen liegen tiefer im Neckartal die nicht oder wenig verfestigten **Tieferen Terrassenschotter** (Hoch- und Niederterrasse) der Riß- und der Würm-Kaltzeiten wenige Meter über der heutigen Talaue (Abb. 6-1, Beilage 18). Eine ausführliche Beschreibung der geologischen Schichtfolge ist in „**Geologie in Ludwigsburg**“ auf der Web-Seite der Stadt Ludwigsburg www.ludwigsburg.de publiziert.

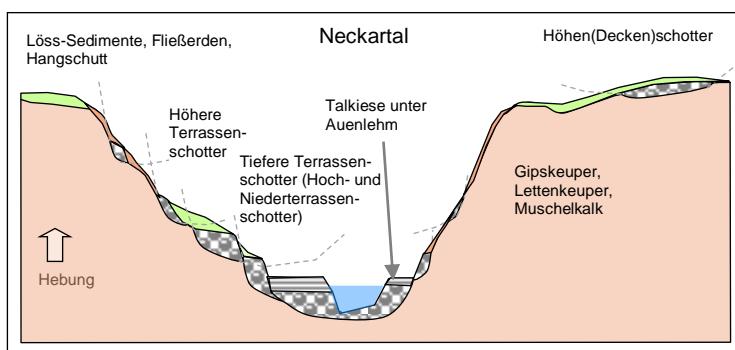


Abb. 6-1: Einschneiden der Flusstäler und Einstachelung der Schotterterrassen im Pleistozän.

Im Profilschema ist das Einschneiden der Flussablagerungen mit der tektonischen Hebung des Landes dargestellt. Die älteren Schotterablagerungen werden großteils ausgeräumt und es bleiben nur die eingeschachtelten Terrassen-Reste an den Hängen übrig (Höhenschotter, Höhere Terrassenschotter). Im Talgrund liegen die breiteren Hoch- und Niederterrassenschotter der Riß- und Würm-Kaltzeit, oft mit einer Lössbedeckung und die Talkiese und Auenlehme aus der aktuellen Holozän-Zeit.

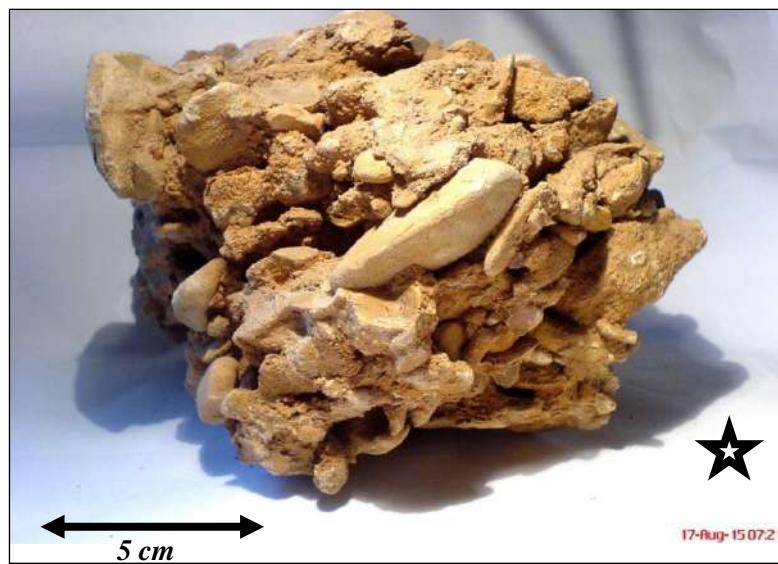
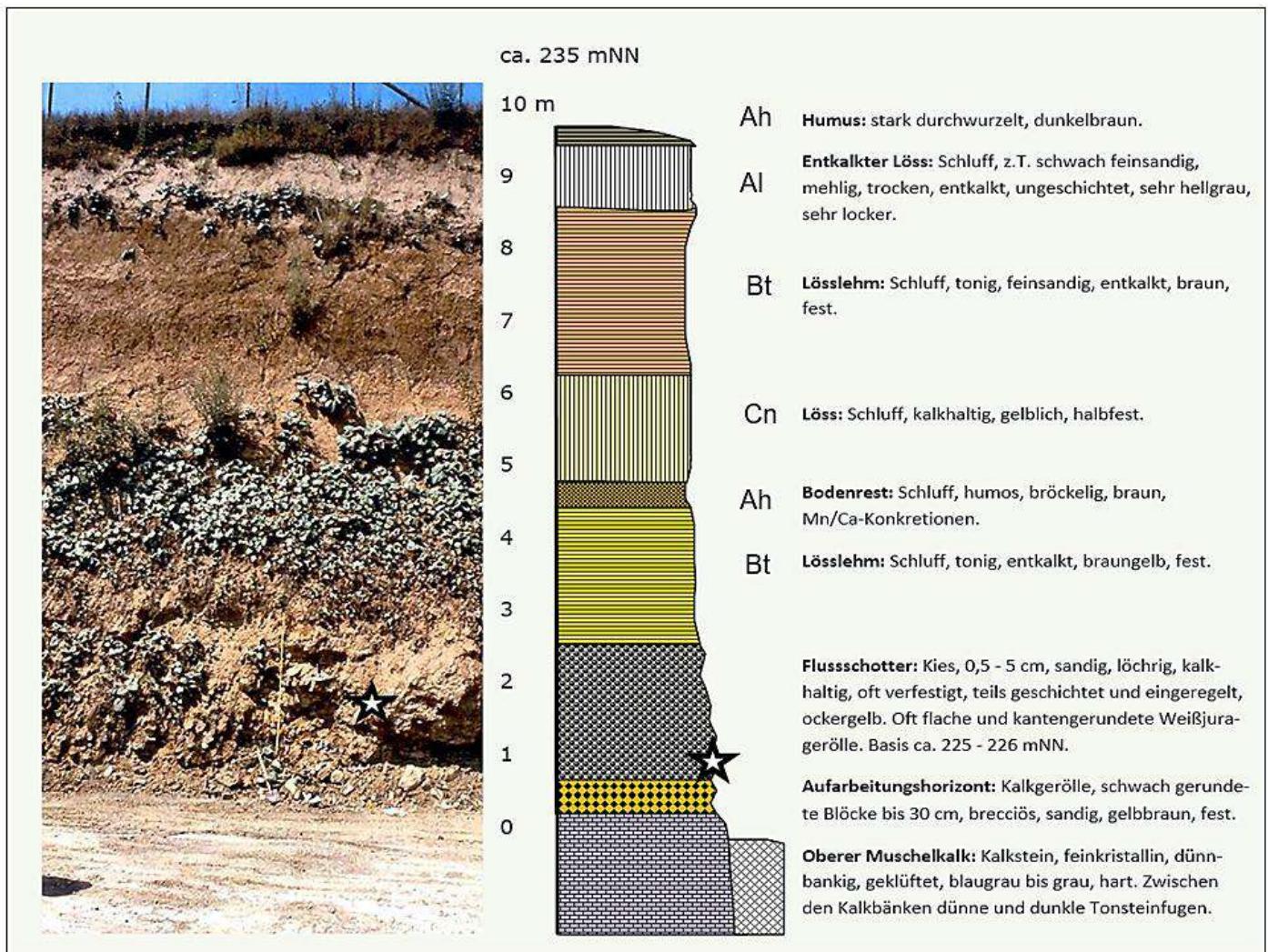


Abb. 7: Profil der quartären Deckschichten an der NW-Wand des ehem. Steinbruchs Hubele, heute Grünpark Hungerberg.

Aufnahme: Goos/Wenninger 1989.
Der Aufschluss wurde 1989 verfüllt.

Bild links: Verfestigte und löchrige Flussschotter (Konglomerat), ehem. Steinbruch Hubele bei ca. 225 - 226 mNN.
Höhere Terrassenschotter des Mittleren Pleistozäns.

Quartäre Sedimente spielen eine bedeutende Rolle als Baugrund, Rohstoff, Grundwasserträger und auch als mögliche Gefahrenquelle in Form von Massenbewegungen. Nichtbindige Sedimente, wie lockerere Sande und Kiese, sind vor allem als Baustoffe für Straßenbau und als Betonzuschlagstoffe begehrte. Sehr reine Quarzsande (um die 98 %) spielen in der Glasindustrie eine wichtige Rolle. Schwach-bindige Gesteine, wie schluffige Lehme, haben große Bedeutung für die Herstellung von Mauerziegeln. Bindige Sedimente, wie Lehme und Tone, sind wichtig für die keramische Industrie, Ziegelherstellung und für die chemische Industrie, zum Beispiel als Flussmittel. Massive bzw. zementierte Gesteine, wie zum Beispiel Travertin oder ein poröser Kalkstein, spielen als Werk- und Dekorsteine eine gewisse Rolle in der Architektur. Quartäre Sedimente sind oft der Boden, auf und in dem wir bauen und spielen bei geringer Wasser-durchlässigkeit auch im Deponiebau eine Rolle. In vielen Landschaften sind sie auch als Grundwasserspeicher von Bedeutung, z.B. kiesig-sandige Talsedimente von Pleistozän und Holozän.

Zusammengestellt nach David Bressan Geoconsult, <http://www.bressan-geoconsult.eu/>

3.3 Schichtlagerung und Tektonik (tektonikos = gr. "die Baukunst betreffend")

Die Tektonik beschreibt den Aufbau, die Struktur, die Lagerung und die Bewegung der spröd-elastischen und der plastischen Gesteine in der Erdkruste und im Oberen Erdmantel. Die Erdkruste steht praktisch überall unter einer mehr oder weniger hohen tektonischen Spannung. Bei anhaltend hohen Scherkräften im spröden Gestein, z.B. an zwei aneinander vorbei gleitenden Gesteinsschollen (Transformstörung), gibt es zunächst nur eine minimale und andauernde Bewegung als elastische und reversible Dehnung, aber mit dem Aufbau einer permanenten tektonischen Spannung (Kraft, die in ein bestimmte Richtung wirkt). Beim Überschreiten einer bestimmten Grenze wird der Reibungswiderstand im Gestein überwunden und es kommt durch den Verlust der Kohäsion (Scherfestigkeit) zu Brüchen im Gestein entlang von Bruchlinien mit einer ruckartigen und meterweiten Massenverschiebung der Schollen gegeneinander (elastisches Zurückschnellen). Das führt zur Freisetzung der gespeicherten elastischen Energie als Wärme und in Form von elastisch-seismischen Wellen im Gestein. Diese verbreiten sich als vibrierende Erdbeben mit elastisch-reversiblen Verformungen in der Erdkruste und im Erdmantel über weite Bereiche. Tiefer unter der Erdoberfläche in der spröd-plastischen Übergangszone ab ca. 10 - 25 km und tiefer bei 150 - 400 °C und unter höherem Umfassungsdruck, verhalten sich die Gesteine in der Erdkruste duktil, also sehr langsam fließend mit einer plastischen und irreversiblen Dehnung. Hier entstehen bei Gesteinsbewegungen, Faltungen und Überschiebungen mit plastischen Verformungen, z.B. bei der Gebirgsbildung (Kap. 6). Magmatite und Metamorphe reagieren oberflächennah eher spröde und brechen an Störungsfächen, während sich jünger und weiche Sedimentgesteine eher duktil verhalten und Falten bilden. Sprödes oder duktile Verhalten ist auch von der Dauer der Belastung abhängig und Gesteine brechen eher durch Dehnung als durch Druck (siehe Kap. 5.6).

Baden-Württemberg gehört tektonisch zum größten Teil zur ca. 80.000 km² großen **Süddeutschen Scholle**, die ab ca. 40 Ma allmählich mit 1° - 5° nach Südosten verkippt wurde. Diese wird im Westen vom Oberrheingraben begrenzt, der infolge einer starken Aufwölbung der Grundgebirgssockel von Schwarzwald, Vogesen und Odenwald während der Paläogenzeit, beginnend vor 52 Mio. Jahren, eingebrochen ist, und der mit bis über 4000 m mächtigen Sedimentschichten aufgefüllt wurde. Diese starke Aufwölbung führte zusammen mit der Bildung der Alpen auch zu einer Hebung und Verkipfung der ursprünglich horizontal abgelagerten Sedimentgesteine in Baden-Württemberg nach Südosten. Durch die tektonische Hebung des Landes haben sich die Flüsse eingeschnitten und die unterschiedlich widerstandsfähigen und wasser durchlässigen Sedimentgesteine wurden unterschiedlich schnell und stark abgetragen. Auf diese Weise ist aus dem Tafeldeckengebirge das nach Nordosten auffächernde **Schwäbisch-Fränkische Schichtstufenland** mit seinen Steilstufen und Verebnungsflächen entstanden. Südlich der Albhochfläche im Alpenvorland von Oberschwaben fallen die Schichten von Trias und Jura im sogenannten "Nordalpinen Molassebecken" flexurartig bis in über 6000 m Tiefe ab. Das Molassebecken ist mit dem Abtragungsschutt der Alpen aus der Paläogen- und Neogen-Zeit gefüllt. Am Alpenrand wurden die Molasseschichten unter dem Einfluss der sich nach Norden vorschließenden Alpen aufgebogen, gefaltet und abgeschart (Aufgerichtete Molasse und Subalpine Molasse) und bilden im Allgäu als langgestreckte, alpenparallele Hügelketten eine Schichtrippenlandschaft. Daran anschließend folgt die schroffe Hochgebirgslandschaft der Alpen mit ihrem komplexen Falten- und Deckenbau (Abb. 1, 2, 2a). Kleinräumig betrachtet gestaltet sich der tektonische Bau von Baden-Württemberg jedoch differenzierter. Linienförmige Verwerfungen (Auf- und Abschiebungen), z.T. mit Horst- und Grabenstrukturen und weitflächig wellenartige Mulden- und Sattelstrukturen, z.B. der Schwäbisch Fränkische Sattel, verlaufen unabhängig von der generellen südöstlichen Schichtneigung in bevorzugten Richtungen durch das Land (NE - SW = variszische-, NW – SE = herzynische, NNE - SSW = rheinische Richtung). Diese sind oft für die speziellen geotektonischen und landschaftlichen Verhältnisse mitverantwortlich. Im Kraichgau, im Gebiet von Stromberg und Heuchelberg, im Bereich der Löwensteiner Berge (Fränkische Mulde) und im Fildergraben bei Stuttgart und Leonberg sind jüngere Sedimentschichten von Keuper und Jura in tektonischen Tieflagen (Mulden und Gräben) durch sogenannte **Reliefumkehr** erhalten geblieben und bilden dort heute oft bewaldete Hochgebiete.

Das tektonische Hauptelement im Raum Ludwigsburg ist der nach Ost-Nordost abtauchende **Schwäbisch-Fränkische Sattel**, der sich von der Hornisgrinde im Nordschwarzwald bis zum Kocher verfolgen lässt. Diese linienhafte, über 100 km lange und etwa 30 km breite Gesteinsaufwölbung um ca. 20 m (Leistenscholle) trägt mit dazu bei, dass in Ludwigsburg westlich des Neckars die exponierten Schichten von Gipskeuper und Lettenkeuper z.T. stark abgetragen wurden, und dass in der nördlichen Innenstadt im Bereich Heilbronner Straße/Stresemannstraße die Schichten des Oberen Muschelkalks stellenweise oberflächennah unter den quartären Deckschichten liegen. Am nördlichen Markungsrand von Ludwigsburg beginnt die tiefe Grabenstruktur der **Neckar-Jagst Furche**. Bei Eglosheim fallen die Schichten steil nach Nordwesten zur **Pleidelsheimer Mulde** ab, so dass im Bereich Monrepos und Tamm wieder Gipskeuper unter den Deckschichten liegt. Im Gewann Hundshalde waren bei Bauarbeiten diese abtauchenden Gipskeuperschichten mit bis zu 10 % Gefälle zu sehen. Im westlichen Bereich von Eglosheim bilden eine Reihe kleiner Verwerfungen eine **Horststruktur**. Im nördlichen Bereich von Ludwigsburg ist der **Heutingsheimer Sattel** für die dortige Hochlage des Oberen Muschelkalks verantwortlich. Im Tälchen beim Kugelberg verläuft die sogenannte **Säubrunnenstörung** mit Sprunghöhen von bis zu 30 Metern. Morphologisch macht sie sich durch Hangkanten im Gelände und durch einen Gipskeuperstreifen in mitten von Lettenkeuper und Oberem Muschelkalk bemerkbar. Dieser Bereich kann als Südwestgrenze der **Neckar-Jagst Furche** angesehen werden. Nordöstlich von Poppenweiler ist die **Lemberg Struktur** mit drei Verwerfungen und einer Schichtmulde für die Tieflage der Schichten im Bereich des Lembergs verantwortlich (Abb. 5 + 8). Der zentrale Teil des Lembergs liegt gegenüber der Umgebung tektonisch um bis zu 50 Meter tiefer. So ist dort durch Reliefumkehr in einem schmalen Bereich die komplette Schichtfolge des weicheren Gipskeupers unter einer kleinen Kappe aus

erosionsbeständigem Schilfsandstein erhalten geblieben. Ähnliche Verhältnisse haben auch zur Bildung des Hohenaspergs beigetragen. Im Stuttgarter Raum bestimmt der von Nordwesten nach Südosten verlaufende und ca. 14 km breite **Fildergraben** mit ca. 100 m Sprunghöhe Geologie und Landschaftsbild und ist für das nach Nordwesten vorspringende Keuperbergland des Glemswaldes bei Leonberg (Engelberg) und für die Bildung der ausgedehnten Filderfläche mit Gesteinen des Frühen Juras verantwortlich (Abb. 9). Die Breite der tektonischen Störungs- und Zerüttungszonen in den felsartigen Grundsichten kann wenige Zentimeter bis mehrere Meter betragen und kann bei der Gründung von Bauwerken zu Problemen wegen rasch wechselnder Gesteinseigenschaften und Gesteinsauflockerungen führen (tektonische Brekzien, Mylonit, Kataklastit, Kakirit). Das gilt v.a. bei engräumig gestaffelten Verwerfungszenen, die bei der gutachterlichen Rastererkundung nur schwer erkennbar sein können.

Reliefumkehr

Durch die langsamen und konvergenten, divergenten und transformen Bewegungen der Kontinentalplatten, durch die damit verbundenen Spannungen in der Erdkruste und durch die damit verbundenen Gebirgsbildungen werden einzelne Landschaftsbereiche gegenüber der allgemeinen Schichtlage der Umgebung über lange Zeiträume wellig und durch Brüche abgesenkt (Mulden- und Grabenbildung) oder angehoben (Sattel- und Horstbildung). In den so eingetieften Bereichen liegen dann oft harte und wasserdurchlässige Schichten, wie z.B. Sandsteine und Karbonatgesteine neben weichen und wasserstauenden Schichten der Umgebung, wie z.B. Ton- und Mergelsteine. Die weicheren Gesteine wurden und werden von der Bacherosion und schneller abgetragen, während die harten und wasserdurchlässigen Schichten in der tektonischen Tieflage die unterlagernden weichen Schichten vor der Abtragung bis heute schützen. So konnten im Bereich der Mulden- und Grabenstrukturen mit der Zeit die Umgebung überragende Zeugberge, wie z.B. der Lemberg, der Hohenasperg, der Strom- und Heuchelberg, die Löwensteiner Berge und die Keuperberge von Stuttgart und Leonberg im Fildergraben entstehen.

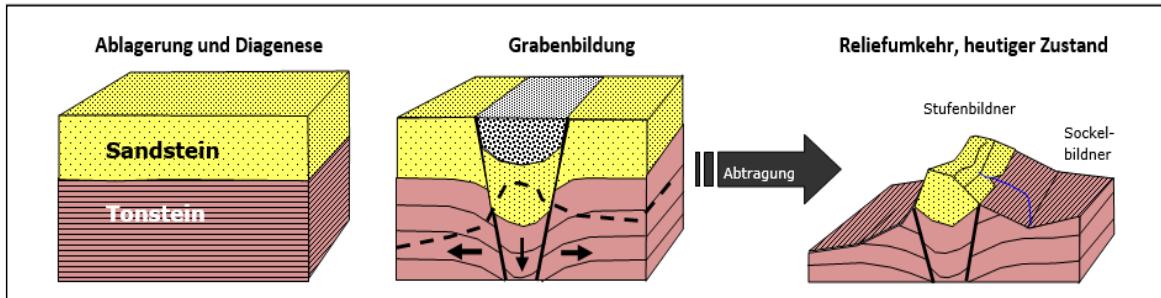


Abb. 7:
Reliefumkehr
durch
Grabenbildung.

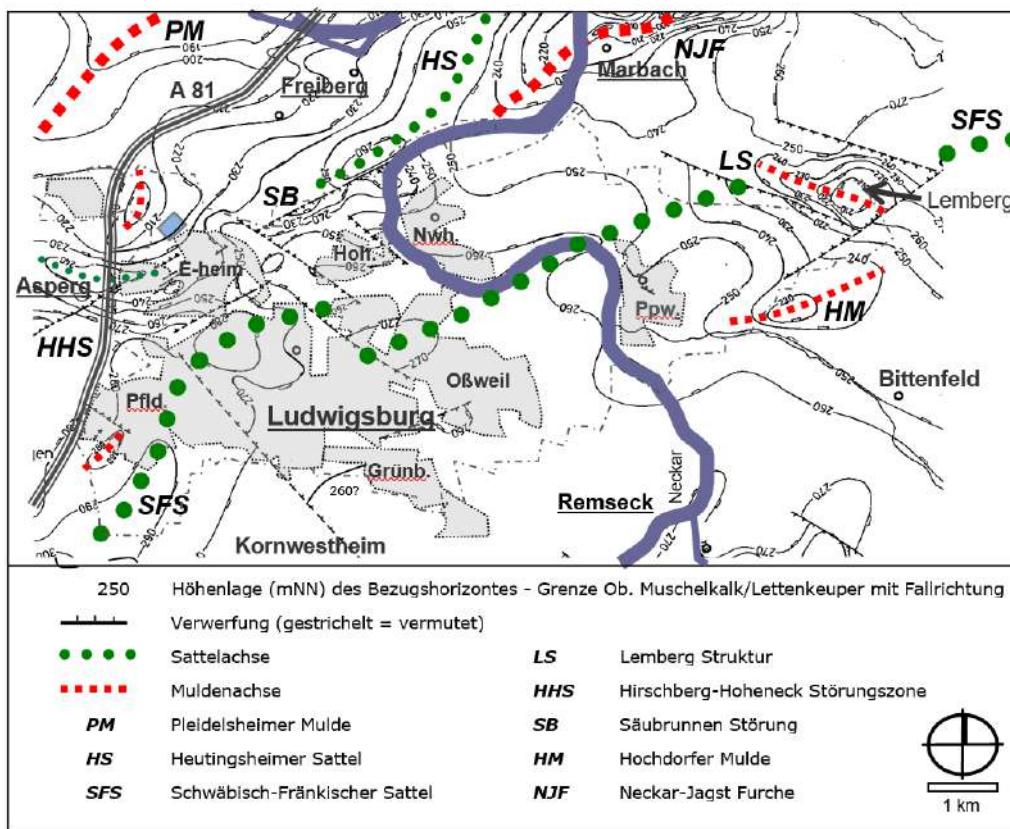


Abb. 8: Schichtlagerung und tektonische Strukturen im Raum Ludwigsburg.

Dargestellt sind bekannte und aufgrund von entsprechenden Daten zu vermutende tektonische Störungszonen. Weitere solche Zonen können vorkommen und können bei Bauvorhaben zu Mehrkosten bei der Gründung führen. Die wellige Lagerung der geologischen Schichten (Mulden- und Sattelstrukturen) wird durch Linien gleicher Höhe an der Schichtgrenze Oberer Muschelkalk/Lettenkeuper dargestellt. Dieser Bezugshorizont wurde durch zahlreiche Baugrundbohrungen punktuell erfasst und ist auch im Gelände oft zu finden. Durch rechnerische Interpolation der einzelnen Punkte erhält man eine flächige Darstellung der Höhenlage dieser Schichtgrenze.

Die größeren tektonischen Störungszonen (Verwerfungen) sind am Versatz der Höhenlinien erkennbar.

Karte ergänzt aus H. Brunner (1998): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1 : 50 000, Erläuterungen zum Blatt Stuttgart und Umgebung. LGRB-BW, Freiburg.

3.4 Erdbebensicherheit

Bei der Erdbebentätigkeit in Deutschland handelt es sich nicht um die weltweit häufig vorkommenden **Plattenrandbeben**, wo große Erdkrustenplatten untereinander abtauchen oder horizontal aneinander vorbei gleiten, wie z.B. in Kalifornien, Japan, Sumatra und Chile, sondern um die selteneren **Intraplattenbeben**. Die Erdbeben in Deutschland können als Auswirkungen lokaler Spannungskonzentrationen oder Schwächezonen, hervorgerufen durch geologische Heterogenitäten in der Erdkruste verstanden werden. Übersteigen die Spannungen die Festigkeit der Gesteine im Untergrund, so kommt es zum Bruch der Gesteine. Ein Teil der aufgestauten Energie wird in Form von seismischen Wellen freigesetzt und bei entsprechender Stärke an der Oberfläche als Erdbeben wahrgenommen. Als Hauptmotor für diese Vorgänge wird die seit über 70 Ma andauernde Bewegung der Afrikanischen und Apulischen Erdkrustenplatte nach Norden gegen die Europäische Platte angenommen, die auch zur Bildung der Alpen geführt hat (siehe Abb. 2a). Die beiden Hauptzentren der Baden-Württembergischen Erdbebentätigkeit liegen im Dreiländereck im **Raum Lörrach/Basel** und seit Anfang des 20. Jahrhunderts auch im **Zollernalbkreis bei Albstadt und Balingen** in 3 – 10 km Tiefe. Der Bruchtyp dokumentiert eine horizontal und nordwestlich orientierte Kompression. Innerhalb der durch Bruchtektonik geprägten südwestdeutschen Großscholle werden zwei in Süd-Nord-Richtung verlaufende Scherzonen vermutet: Die Kaiserstuhl-Scherzone von Basel bis Lorsch und die Albstadt-Scherzone vom Schweizer Kanton Glarus bis in den Stuttgarter Raum. Die Erdbeben führen in Südwestdeutschland zu Blattverschiebungen, wobei sich der westliche Teil der Scherfläche nach Süden und der östliche Teil nach Norden bewegen. Die Erdbebenaktivitäten im Oberrheingraben finden ihre Fortsetzung nach Nordwesten und Westen bis in die Niederrheinische Bucht (Raum Köln) und nach Belgien und Holland, wo weitere Erdbebenhauptpunkte in Deutschland und in Europa liegen. An der Landesgrenze von Sachsen und Thüringen im Vogtland liegt ebenfalls ein Gebiet mit erhöhter Erdbebentätigkeit. Die **Energie eines Erdbebenherd** wird gelegentlich noch nach der logarithmischen "**Richter-Skala M_L** " angegeben. Heute wird die logarithmische "**Moment-Magnituden-Skala M_w** " verwendet, welche die Vorgänge im Erdbebenherd mathematisch-physikalisch besser beschreibt und für Magnituden über 6,5 und über große Entfernen besser geeignet ist. Beide Skalen sind mathematisch-theoretisch nach oben offen, wobei aus physikalischen Gründen eine Erdbebenstärke über $M_w = 10,5$ nicht möglich ist und die Richter-Skala ab $M_L = 6,5$ ungenau wird. Die Erdbebenkalen sind logarithmisch. Ein Magnitudensprung, z.B. von 4 nach 5 bedeutet eine 10-fach stärkere Bodenbewegung und die 33-fache Energie. Die Schäden an der Oberfläche (Schadensintensität = I_0) sind von der Entfernung zum Erdbebenherd und vom geologischen Aufbau des Untergrundes abhängig. Sie werden nach der 12-teiligen "**Europäischen Makroseismischen Skala -EMS-**" bewertet, die aus der **Mercalli-Scala** entwickelt wurde (Abb.- 9b). Bei Erdbeben unter Meeresgebieten kommt es gelegentlich zu verheerenden Flutwellen (Tsunami). In den vergangenen 200 Jahren wurden in Baden-Württemberg Erdbeben mit einer Magnitude bis zur Stärke $M_L = 6,1$ und mit einer Schadensintensität nach der Makroseismischen Skala von bis zu $I = 8$ registriert. In Basel hat sich 1356 ein verheerendes Erdbeben mit der Magnitude $M_L = 6,5$ - 7 und der Schadensintensität $I = 9$ ereignet. Entlang des Oberrheingrabens kommt es häufiger zu mittelstarken Erdstößen. Beim bisher stärksten Beben auf der Schwäbischen Alb im Jahr 1911 mit einer Magnitude von $M_L = 6,1$ sind im Raum Ludwigsburg Schäden der Intensität $I = 6$ - 7 aufgetreten. Die Fachleute gehen davon aus, dass in Südwestdeutschland maximale Erdbebenstärken der Magnitude $M_L = 6,5$ auftreten können. Dann wäre mit Schäden der Intensität um $I = 8$ zu rechnen. In Baden-Württemberg ist etwa alle 10 Jahre mit einem mittelstarken Erdbeben mit Gebäudeschäden und Betriebsstörungen in größerem Umfang zu rechnen (EMS 6 - 7).

Erdbebenzone	EMS-Skala	Wirkung
0	6 – 6,5	Leichte Gebäudeschäden (z. B. Risse im Putz, vor allem bei Gebäuden in schlechtem Bauzustand)
1	6,5 – 7	Gebäudeschäden, z. B. Risse und Spalten in Mauerwerk, einstürzende Kamine. Die meisten Personen in Gebäuden erschrecken und flüchten nach draußen.
2	7 – 7,5	Möbel vernaschen und viele Gegenstände fallen aus Regalen und offenen Schränken. Viele normale Gebäude werden beschädigt, so etwa durch Mauerrisse und teilweise einstürzende Kamine.
3	> 7	

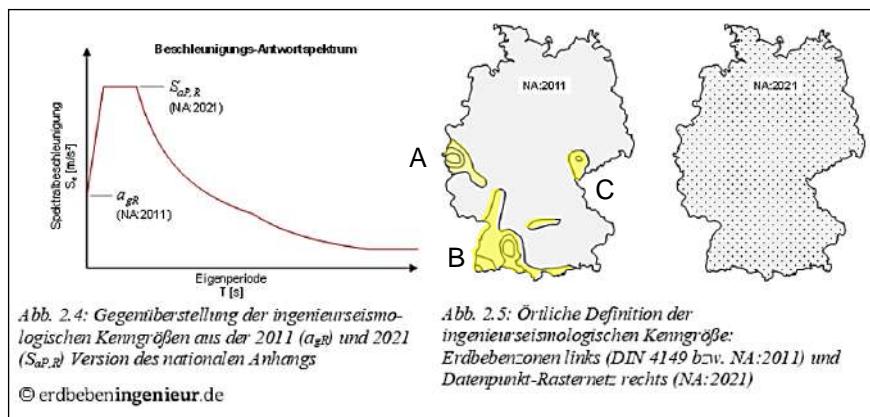
Abb. 9:
Erdbebenzonen nach DIN 4149 und Intensitätsklassen (EMS) in Deutschland.
Quelle: Wikipedia

Erdbebengerechtes Bauen (DIN EN 1998-1:2010-12 -Eurocode 8 und DIN EN 1998-1/NA:2023-11)

Die erdbebengefährdeten Gebiete in Deutschland (Bayern, Baden-Württemberg, Thüringen, Sachsen und entlang des Niederrheins) wurden bisher in der DIN 4149:2005-4 in 4 Erdbebenzonen (Zone 0 bis 3) mit unterschiedlichen Intensitätsintervallen und Bemessungswerten für die Bodenbeschleunigung (a_g) unterteilt. Innerhalb dieser Zonen werden 3 geologische Untergrundklassen R, S, T und 3 Baugrundklassen A, B, C unterschieden. Weil die Erdbebengefahr örtlich unterschätzt wurde, wurde im Jahr 2021 die DIN 4149:2005-4 durch die neue DIN EN 1998-1:2010-12 (Eurocode 8) mit dem derzeit aktuellen "Nationalen Anhang" DIN EN 1998-1/NA:2023-11 abgelöst, die in Baden-Württemberg anscheinend noch nicht bauaufsichtlich eingeführt wurde, aber zivilrechtlich gültig ist. Bauaufsichtlich ist noch die DIN 4149 mit aller Vorsicht die für die Genehmigungsseite geltende Norm. Prof. Sadegh-Azar, *Fachzeitschrift Bauingenieur*, 08.02.2023: "Der Tragwerksplaner schuldet dem Bauherrn aber ein Bauwerk nach dem Stand der aktuellen Technik und die Entwürfe müssen nach der neuen Norm oder gleichwertig bemessen werden". Es ist somit naheliegend, dass die neue DIN nebst dem Nationalen Anhang die allgemein anerkannten Regeln der Technik darstellt und angewendet werden sollte. Die neue DIN basiert auf einer Neueinschätzung der Erdbebengefährdung unter Berücksichtigung der o.g. Untergrund- und Baugrundklassen, die weiterhin gelten. Die ingenieureseismologische Kenngröße zur Bestimmung der anzusetzenden Erdbebenlast hat sich geändert, so dass nun örtlich mit höheren oder mit geringeren Erdbebenlasten als zuvor zu rechnen ist. Die 4 Erdbebenzonen der DIN 4149 fallen zugunsten eines engen Erdbebengefährdungsrasters weg und es gibt auch keine Erdbebenkarte und Intensitätsintervalle in der bisherigen Form mehr (Abb. 28a).

Die Erdbebenbeschleunigung (nicht Bodenbeschleunigung, sondern Antwortbeschleunigung – $S_{aP,R}$ = Plateauwert des Antwortspektrums, umrechenbar auf die alte Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung a_R : $a_R = S_{aP,R} \cdot 2,5$) kann für jeden Ort in Deutschland auf entsprechenden Internetseiten abgerufen werden, z.B. beim GeoforschungsZentrum Potsdam unter <https://www-app5.gfz-potsdam.de/d-eqhaz16/>

Zur Risikobewertung gibt es die **Bedeutungskategorien I, II, III, IV** nach DIN EN 1998-5/NA (Eurocode 8). Damit werden Bauwerken hinsichtlich ihrer Bedeutung für die öffentliche Sicherheit und ihrer Sensibilität gegenüber einem Erdbeben klassifiziert. Bedeutungskategorie I umfasst Bauwerke mit geringer Bedeutung, II umfasst Bauwerke mit normaler Bedeutung, III und VI umfasst sehr sensible und sicherheitsrelevante Bauwerke. Die Bedeutungskategorie wird durch einen **Bedeutungsbeitrag γ** ausgedrückt, der in die Berechnungen mit einfließt. Der **Bodenparameter S** wird in Abhängigkeit der Untergrundverhältnisse und der Höhe der Spektralbeschleunigung $S_{aP,R}$ zugeordnet. In Erdbebenregionen können bei simplen Bauwerken, z.B. Einfamilienhaus, vereinfachte Nachweise zur Anwendung kommen. Die Materie ist auch für den Raum Ludwigsburg komplexer geworden und muss angepasst an den jeweiligen Baugrund und an das Bauvorhaben von Fachleuten bearbeitet werden. Die Anwendung der neuen DIN EN führt gesamteinheitlich nicht zu einer Ausweitung der Erdbebengebiete. Es kommt aber vielerorts zu einem veränderten Erdbebenlastniveau. Einige Bereiche werden kleiner, andere erfahren eine Ausweitung. Örtlich kommt es zu einer Erhöhung oder Verringerung der maximalen Bodenbeschleunigung.



Baugrundklassen (≤ 20 m Tiefe)		Geologische Untergrundklassen (> 20 m)	
A	unverwitterte Festgesteine Scherwellengeschwindigkeiten: > 800 m/s.	R	Festgestein Gebiete
B	mäßig verwitterte Festgesteine oder grob- bis gemischtkörnige Lockergesteine in fester Konsistenz Scherwellengeschwindigkeiten: 350 m/s – 800 m/s.	S	Gebiete flacher Sedimentbecken und Übergangszonen
C	gemischt- bis feinkörnige Lockergesteine in mindestens steifer Konsistenz Scherwellengeschwindigkeiten: 150 m/s – 350 m/s.	T	Gebiete tiefer Sedimentbecken

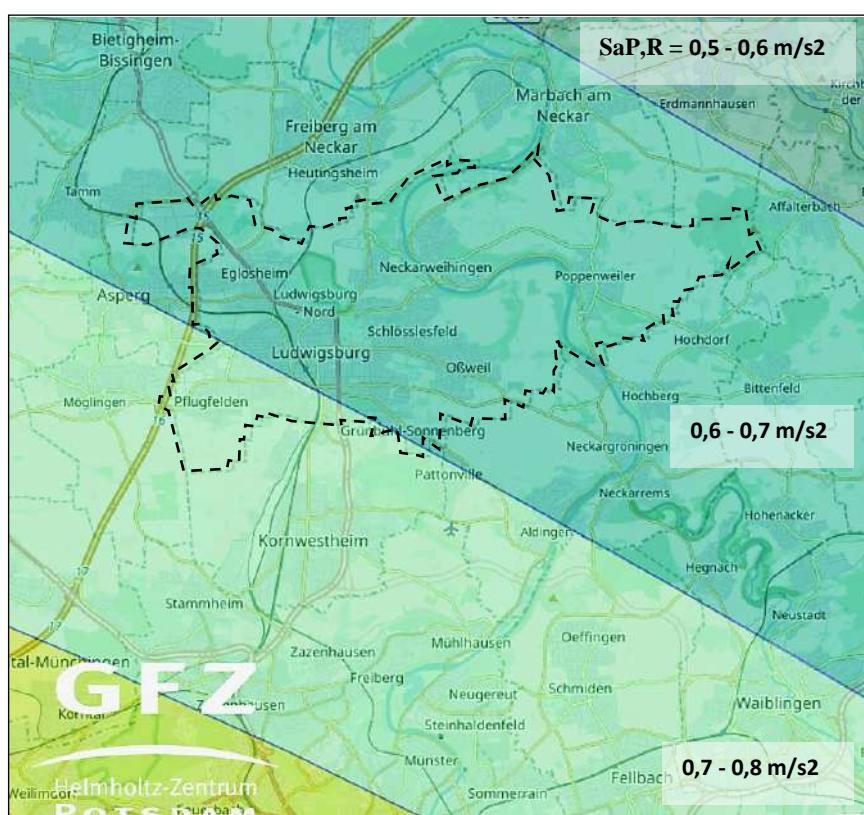
Abb. 9a: Vergleich ingenieurseismische Kenngrößen - alte DIN 4149 – NA 2011, neue DIN EN 1998-1:2010-12, NA 2021.
Quelle ergänzt: Dipl.-Ing. Marius Pinkawa, <https://erdbebeningenieur.de/>

Ergänzt - Erdbebengebiete in Deutschland mit bisher maximaler Stärke:
A: Niederrhein, Kölner Bucht, max. 6,4
B: Rheingraben, Schwäbische Alb, max. 7,1
C: Vogtland, max. 4,6

Untergrundtyp	S (Parameter)
A – R	1,00
B – R	1,25
C – R	1,50
B – T	1,00
C – T	1,25
C – S	0,75

Baugrund- und Untergrundklassen

Quelle: Muhammed Al Koussini, et al. 2021: Vergleich der neuen Erdbebenkarten in Deutschland und mit den Anrainerstaaten. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.



Kartenbeispiel der Erdbebengefährdung für den Raum Ludwigsburg.

Die Erdbebeneinwirkung für diese Karte wird durch ein elastisches Antwortspektrum mit einer Referenz-Wiederkehrperiode von TNCR = 475 Jahren beschrieben, was einer Wahrscheinlichkeit des Auftretens oder Überschreitens von 10 % in 50 Jahren entspricht.

Ludwigsburg liegt hier im Bereich der Antwortbeschleunigung $S_{aP,R} = 0,6 - 0,8$ m/s². Damit übersteigt die Spektralantwort von $S_{aP,R}$ den Wert von $0,6$ m/s² = $0,06$ g. Nur in Regionen mit $S_{aP,R} \leq 0,6$ darf eine Erdbebenauslegung für übliche Hochbauten unterbleiben. Die Angaben hier sind rein informativ! Die Werte für ein konkretes Bauvorhaben müssen von Fachleuten adressgenau erhoben werden.

Quelle: Plattform zur Abfrage von gefährdungskonsistenten Antwortspektren (UHS) für beliebige Punkte in Deutschland sowie von nationalen Erdbebengefährdungskarten nach dem Berechnungsmodell von Grünthal et al. (2018). GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam [Hrsg.], Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.

<http://www.gfz-potsdam.de>

Abb. 9b**Schadensintensität I₀ nach der Europäischen Makroseismischen Skala - 1998**

(EMS-98 Kurzfassung, abgeleitet von der Mercalli-Skala).

Diese vereinfachte und verallgemeinerte Ansicht der EMS-98 ist nicht für Intensitätszuordnungen geeignet!

Die Schadensintensität I₀ ist nur ungefähr mit der Magnitude M korrelierbar. Sie hängt nicht nur von der Magnitude, sondern auch von der Tiefe und Entfernung des Hypozentrums und stark vom geologisch-tektonischen Aufbau des Untergrundes ab. Bindige und körnige Sedimente, v.a. mit Porenwasser, reagieren empfindlicher auf Erdbebenwellen als harte und felsartige Sedimente (Wackelpuddingeffekt). Ehemalige Seesedimente und Aufschüttungen mit einer Eigenschwingungsperiode von ein bis drei Sekunden wirken wie ein Resonanzboden und verstärken die Wirkung um das 5 bis 20-fache. Bei Bauwerken mit der selben Eigenschwingung potenziert sich die Schadwirkung, so geschehen beim Beben 1985 in Mexiko City (Seesedimente) und 1989 beim Loma Prieta/San Francisco-Beben in Kalifornien (Aufschüttungen -> Bodenverflüssigung durch Porenwasserüberdruck mit Absenkung).

Schadensintensität I ₀	Charakterisierung	Wahrnehmungen und Schäden	Ungewöhnliche Magnitude	Bodenbeschleunigung (Näherungswerte)
I	nicht fühlbar	Nicht fühlbar, nur instrumentell zu beobachten.	1 - 2	(1 g = 9,81 m/s ²) g m/s ²
II	kaum bemerkbar	Nur vereinzelt von ruhenden Personen wahrgenommen.	2 - 3	
III	schwach wahrnehmbar	Von wenigen Personen in Gebäuden wahrgenommen. Ruhende Personen fühlen ein leichtes Schwingen oder Erschüttern.	2 - 3 Oft in Vulkangebieten, z.B. Neapel, Ätna.	
IV	deutlich wahrnehmbar	Im Freien vereinzelt, in Gebäuden von vielen Personen wahrgenommen. Einige Schlafende erwachen. Geschirr und Fensterklirren, Türen klappern	3 - 4 Beben bei den tiefen Geothermiebohrungen in Basel 2006 und St. Gallen 2013.	keine Gefährdung 0,003 0,03 Vorkommen etwa 130.000 Mal pro Jahr.
V	stark wahrnehmbar	Im Freien von wenigen, in Gebäuden von den meisten Personen wahrgenommen. Viele Schlafende erwachen. Wenige werden verängstigt. Gebäude werden insgesamt erschüttert. Hängende Gegenstände pendeln stark, kleine Gegenstände werden verschoben. Türen und Fenster schlagen auf oder zu.	4	Eine bis... 0,01 - 0,03 0,1 - 0,3
VI	leichte Gebäudeschäden	Viele Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Einige Gegenstände fallen um. An vielen Häusern in schlechtem Zustand entstehen leichte Schäden, wie feine Mauerrisse und das Abfallen von kleinen Verputzteilen, Herabfallen von Schornsteinen.	4 - 5 Albstadt 2022, bei New York 2024, bei Neapel 2025.	0,03 - 0,05 0,3 - 0,5 Vorkommen etwa 14.000 Mal pro Jahr.
VII	Gebäudeschäden	Die meisten Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Möbel werden verschoben. Gegenstände fallen in großen Mengen aus den Regalen. An vielen Häusern solider Bauart treten mittlere Schäden auf (kleine Mauerrisse, Abfallen von Putz, Herabfallen von Schornsteinteilen). Vornehmlich Gebäude in schlechtem Zustand zeigen größere Mauerrisse und Einsturz von Zwischenwänden.	5 - 7 Bei Köln 1756, Albstadt 1911, 1978, Japan 2024, Istanbul 2025.	0,06 - 0,09 0,6 - 0,9 Gefährdung
VIII	schwere Gebäudeschäden	Viele Personen verlieren das Gleichgewicht. An vielen Gebäuden einfacher Bausubstanz treten schwere Schäden auf, d.h. Giebelteile und Dachsimse stürzen ein. Einige Gebäude sehr einfacher Bauart stürzen ein.	6 - 8 Basel 1356, Mittelitalien 2009, 2016, Marokko, Afghanistan, Japan 2023, Alaska 2025	erhöhte Gefährdung
IX	zerstörend	Allgemeine Panik unter den Betroffenen. Auch gut gebaute aber gewöhnliche Bauten zeigen sehr schwere Schäden und teilweisen Einsturz tragender Bauteile. Viele schwächere Bauten stürzen ein.	7 - 9 San Francisco 1906, Friuli 1976, Haiti und Sulawesi 2001, Nepal 2015, Osttürkei 2023, Taiwan 2024, Myanmar 2025, Kamtschatka 2025	0,3 - 0,4 3 - 4 Vorkommen etwa 20 Mal pro Jahr.
X	sehr zerstörend	Viele gut gebaute Häuser werden zerstört oder erleiden schwere Beschädigungen. Bergrutsche und Spalten treten auf.	8 - 9 Mexiko-City 1985, Sumatra 2006, Chile 2010.	0,5 - 0,6 4 - 5 Vorkommen etwa 1 Mal pro Jahr.
XI	verwüstend	Die meisten Bauwerke, selbst einige mit guter, erdbeben-gerechter Konstruktion und Ausführung werden zerstört. Bergrutsche und große Spalten treten auf.	9 Kaskadien-USA 1700, Chile mit 9,5 1960, vor Sumatra 2004, vor Japan 2011, jeweils mit Tsunami.	hohe bis... 0,8 8 Vorkommen etwa 5 - 10 Mal pro 100 Jahre.
XII	vollständig verwüstend	Nahezu alle Konstruktionen werden zerstört. Die Erdoberfläche und Landschaft wird stark verändert.	10 Nach nie registriert. Meteoriteneinschlag, globale Katastrophe.	> 0,9 9

3.5 Hydrogeologische Verhältnisse

In Ludwigsburg gibt es 3 Hauptgrundwasserstockwerke (Beilage 11 – 14, Beilage 19):

Das obere Stockwerk wird von den oft miteinander gekoppelten, wasserführenden Schichten des Quartärs, des Gipskeupers (Grundgipsschichten) und des Lettenkeupers gebildet (Porengrundwasserleiter und Kluftgrundwasserleiter). Im an sich gering grundwasserführenden Gipskeuper können Verwitterungszonen, Zonen mit Gipsauslaugung (Grundgipsschichten, Mittlerer Gipshorizont) und einzelne Steinmergelbänke mehr oder weniger grundwasserführend sein. Im Lettenkeuper sind die Karbonat- und Sandsteinbänke des Grenzdolomits (Letten-/Gipskeuper), des Hauptsandsteins und einige Dolomitbänke grundwasserführend, während die veränderlich festen Tonsteine und die nicht ausgelagerten Sulfatgesteine im Gipskeuper und Lettenkeuper eher grundwasserstauend sind (schichtiger Kluftgrundwasserleiter). Dieser flach liegende und gering mineralisierte Grund- und Sickerwasserleiter mit Wasserständen von oft wenigen Metern unter Gelände wird bei Bauvorhaben in Ludwigsburg oft ange schnitten. Im schichtigen Kluftgrundwasserleiter des Lettenkeupers wurden auch bei enggerasterten Baugrundbohrungen flachere und tiefer Grundwasserstände nahe beieinander festgestellt. Das zeigt, wie wichtig hier eine sorgfältige Baugrunduntersuchung ist. Örtlich und v.a. in Tallagen können auch gespannte Grundwasserverhältnisse vorliegen. **Das mittlere Stockwerk** wird von den klüftigen und v.a. im Nahbereich zum Vorfluter oft verkarsteten Karbonatgesteinen des Oberen und des Mittleren Muschelkalks zusammen mit den Talkiesen im Neckartal gebildet. Der zusammenhängende Grundwasserhorizont liegt hier zwischen ca. 195 mNN im Neckartal und ca. 220 mNN im Südwesten der Gemarkung. Bei geringer oder fehlender Verkarstung gibt es hier oft eine Stauwasserzone (schwebendes Stockwerk), die bis zu 40 m über dem zusammenhängenden Grundwasserhorizont liegt. Eine Verlehmung kann die hohe Durchlässigkeit der Karsthohlräume vermindern oder verhindern. Das Grundwasser des mittleren Stockwerks ist höher mineralisiert. **Das untere Stockwerk** bildet der klüftige Plattensandstein des Oberen Buntsandsteins. In Hoheneck und im Mathildenhof wurde dieses im Neckartal artesisch gespannte Grundwasser bei ca. 55 – 60 mNN angebohrt und steigt im Bohrloch bis auf ca. 195 bis 203 mNN auf. Das Grundwasser des Buntsandsteins ist stark salz- und sulfathaltig und wird als Sole (29.000 mg/l) im Heilbad Hoheneck therapeutisch genutzt. Während das Grundwasser im oberen und mittleren Stockwerk aus aktuellen Niederschlägen gespeist wird, wurde das Grundwasser im Buntsandstein von mehr als 30.000 Jahren gebildet. Das Versickerungsgebiet liegt ca. 50 km westlich am Ostrand des Nordschwarzwaldes. Zur Beurteilung der Baugrundverhältnisse sind auch Aussagen über den Flurabstand des Grundwassers, über die jahreszeitlich Schwankungen der Wasserstände, über die chemische Zusammensetzung (z.B. Betonaggressivität, Schadstoffe), sowie über mögliche Baubeschränkungen, z.B. im Bereich von Grundwasserschutzgebieten, von Bedeutung. Bei Bauvorhaben ist zu beachten, dass neben dem Wasser des geschlossenen Grundwasserhorizontes auch sogenanntes **Sickerwasser, Stauwasser oder Schichtwasser** aus höher liegenden Boden- und Gesteinsschichten, oft abhängig von Niederschlägen, der Baugrube und den verfüllten Arbeitsräumen zufließen kann (Abb. 19-2a). Das trifft v.a. für Hanglagen und in Tallagen zu und macht ggf. besondere Maßnahmen bei der Wasserhaltung (Absenkung) während der Bauzeit und bei der Abdichtung eines Gebäudeuntergeschosses während der Standzeit gegen Feuchtigkeit, drückendes Wasser und eine Sicherung gegen Auftrieb notwendig (siehe Kapitel 4.5).



Abb. 10:
Hydrogeologische Einheiten und Grundwasserschutzgebiete in Ludwigsburg.
Bis auf einen kleinen Bereich am Lemberg ist die gesamte Markung von Ludwigsburg westlich der punktierten Linie seit 2009 "Vorläufiges Heilquellenschutzgebiet B/1").

○	Wichtige Brunnen	Ausstrich der Schichten des oberen Grundwasserstockwerks: Deckschichten, Talablagerungen, Gipskeuper, Lettenkeuper.
○	Travertin von Poppenweiler	
—	Tektonische Störungen, z.T. vermutet	
[---]	Wasserschutzgebiete mit Brunnen, Zone III	Ausstrich der Schichten des mittleren Grundwasserstockwerks: Oberer Muschelkalk und Obere Dolomite des Mittleren Muschelkalks (nicht aufgeschlossen), Talkiese im Neckartal.
•••	Vorläufiges Heilquellenschutzgebiet B/1	Das untere Grundwasserstockwerk liegt ca. 148 m unter der Neckartalaue im Plattensandstein des Oberen Buntsandsteins (Beilage 13).

3.5.1 Grundwasserführung und Grundwasserstände

In Ludwigsburg fallen im langjährigen Durchschnitt jährlich etwa 750 mm Niederschläge mit Schwankungen von 500 bis 1100 mm/a. Davon verdunsten etwa 60 - 75 % teils direkt und teils über die pflanzliche Transpiration (Evapotranspiration). Etwa 25 - 40 % werden über Bäche und Flüsse abgeführt. Etwa 7 - 25 % versickert im Boden und sammeln sich in den Poren und Klüften der Gesteine als Grundwasser (in Ludwigsburg ca. 100 - 150 mm/a). Eine flächendeckende Auswertung und Darstellung der Grundwasserverhältnisse in Ludwigsburg wurde durch die **Grundwasser-Stichtagsmessung am 13./14. März 1989** ermöglicht, bei der in insgesamt 156 Grundwasseraufschlüssen die Flurabstände eingemessen wurden. Als Ergebnis entstand eine Grundwassergleichenkarte oberflächennaher Bereiche für die verschiedenen Grundwasserstockwerke. Diese Karte ist in Beilage 11 dargestellt. Die Stichtagsmessung im März 1989 dokumentiert einen eher niedrigen Grundwasserstand, der auf die geringen Niederschläge im Winter 1988/89 zurückzuführen ist. Darüber hinaus werden die Grundwasserstände seit 1986 an zahlreichen Messstellen in regelmäßigen Abständen gemessen. Die Auswertung dieser langjährigen Messreihe (Grundwasser-Ganglinien) zeigt sehr gut die Schwankungen der Grundwasserstände in Abhängigkeit des Standorts, der Niederschlagsverhältnissen und der Jahreszeiten (Abb. 11).

Die **Grundwasserführung und die Grundwasserflurabstände** im Porengrundwasserleiter der jungen Lockersedimente der Deckschichten und im Kluft- und Karstgrundwasserleiter der älteren Grundsichten sind im Ludwigsburger Stadtgebiet sehr unterschiedlich (Grundwasserflurabstand = Tiefe der geschlossenen Grundwasserfläche unter Gelände). In einigen Bereichen der Gemarkung reicht das Grundwasser bis nahe an die Erdoberfläche. Es handelt sich hierbei vor allem um die Talauen des Neckars und der Nebenbäche in Pflugfelden, Eglosheim, Innenstadt und Oßweil. **Es gibt zahlreiche Hinweise, dass mit einem erheblichen Wasserandrang in den Talauen und im Lettenkeuper des Gründelbachs (Kläranlage an der B 27-> Schichtmulde), des Riedbachs bei Eglosheim, des Furtbachs sowie im oberen Tälesbach (Bereich ehem. Feuersee, Stadtbad) und weiter südlich in der Leonberger Straße zu rechnen ist.** In diesen Talabschnitten lagern unter gering durchlässigen Bachsedimenten die wasserführenden Schichten des oberen Lettenkeupers einschließlich des klüftigen Grenzdolomits und Reste der ausgelaugten Grundgipsschichten. Die Grundwassereinzugsgebiete können innerhalb ausgeprägter **Schichtmulden** mehrere Quadratkilometer erreichen. Im Unterlauf dieser Tälchen sind die abdichtenden Schichten an der Basis des Lettenkeupers erodiert. Hier versickert das in den Bachsedimenten zirkulierende Grundwasser im unterlagernden und klüftigen Muschelkalk. In Bereichen mit Keuperüberdeckung ist der Obere Muschelkalk oft schwach grundwasserführend. Es gibt aber Ausnahmen, v.a. in tektonisch geklüfteten Bereichen. Zu den Talrändern nimmt die Grundwasserführung wegen der zunehmenden Verkarstung zu. Das gilt v.a. für die Oberen Dolomite des Mittleren Muschelkalks, der durch die Auslaugung der unterlagernden Salinargesteine zerbrochen ist. Im Neckartal ist beim Anschneiden der grundwassererfüllten Kiessande mit einem besonders starken Wasserandrang zu rechnen. Dieser kann zumindest örtlich durch **aufsteigendes Muschelkalk-Grundwasser** noch erhöht werden. Stellenweise ist dieses Grundwasser gespannt. Bei Baugrubenuntersuchungen können in Tallagen, und örtlich auch auf den Gäuflächen **gespannte Grundwasserverhältnisse** angetroffen werden. Wasserabsperrend nach oben sind hier die tonig-bindigen Talsedimente und die Lösssedimente über den wasserführenden, klüftigen Gesteinen des Lettenkeupers. Beim Baugrubenauftreten kann das Grundwasser nach dem Durchteufen der abdichtenden Schicht einige Meter ansteigen, was zu erhöhten Baukosten führen kann. An solchen Standorten sind am ehesten baubedingte Eingriffe in das Grundwasser zu erwarten, die grundsätzlich genehmigungspflichtig und in der Regel mit wasserrechtlichen Auflagen verbunden sind. Da eine Grundwasserhaltung nur während der Bauzeit zugelassen wird, sind ggf. ausreichende technische Vorkehrungen, wie z.B. die Ausbildung druckwasserdichter und auftriebssicherer Untergeschosse, zu treffen (siehe Kapitel 4.5). Bei einer baubedingt temporären Grundwasserabsenkung muss eine mögliche Beeinflussung benachbarter Bauwerke in bindigen Böden vermieden werden (Absenkungstrichter, Beweissicherung). Schadstoffhaltiges Grundwasser oberhalb der Grenzwerte darf nur über ein Absetzbecken und über eine Reinigungsanlage (z.B. Aktivkohlefilter) temporär und kostenpflichtig in die Kanalisation geleitet werden. Außerhalb der Täler beschränkt sich die Wasserführung oft auf klüftige Dolomite und Sandsteine im Lettenkeuper und untergeordnet auch auf einige harte Zwischenlagen im ausgelaugten Gipskeuper. Aber auch in so einer Lage kann der Grundwasserflurabstand sehr gering sein, wie einige Bereiche im Ortskern von Poppenweiler zeigen. Der Verlauf der Grundwassergleichen im Gipskeuper und im Lettenkeuper zeigt ein mehr oder weniger deutliches Gefälle in Richtung auf die Täler, die als Vorfluter wirken. Besondere Bedeutung kommt dabei dem Tälesbach im Stadtzentrum zu. Im Muschelkalk ist die Grundwasserfließrichtung auf den Neckar ausgerichtet. Dies gilt auch für das im Oberen Buntsandstein zirkulierende Sole-Mineralwasser.

In Ludwigsburg schwanken die **Grundwasserstände** und damit die **Flurabstände** jahreszeitlich. Die Grundwasserstände sind im Winter und im Frühjahr oft am höchsten und im Sommer bis Herbst am niedrigsten. Einzelne Starkregenereignisse und Schneeschmelzen mit Regen, können zu kurzzeitig hohen Grundwasserständen mit Überflutungen führen. Im Kuppenbereich des Favoriteparks beträgt die Wasserstandsänderung bis über 7 m, während sie in der Eduard-Spranger Straße in Eglosheim, bei der Kläranlage in Eglosheim oder in der Innenstadt stellenweise bei weniger als 1 m liegt. Nahe des Monrepos-Sees wurden im Grenzbereich Gipskeuper/Lettenkeuper leicht gespannte Grundwasserverhältnisse mit hoher Schüttung angetroffen. Auch in den Tallagen des Neckars und seinen Nebenbächen sind die Schwankungen mit etwa 0,5 bis 2 m meistens gering. Im Stadtteil Oßweil werden in der Straße „Am Hirschgraben“ im Bereich der Tallage Riedle-Lochwaldgraben immer wieder Kellergeschosse mit Grundwasser überschwemmt. Untersuchungen und Messungen der Grundwasserstände über einen längeren Zeitraum haben gezeigt, dass das Grundwasser hier 2 bis 3 m unter Gelände steht und bei Starkregenfällen sehr schnell um 1 bis 2,5 m ansteigen kann. Die Kellergeschosse der älteren Gebäude sind nicht gegen drückendes Wasser geschützt. Im Ortskern von Poppenweiler steht das Grundwasser vielerorts ebenfalls recht flach unter Gelände. Hier gibt es flache Kellergeschosse, die immer wieder oder dauerhaft von Grundwasser durchflossen werden. Im Bereich des Schlosses nördlich der Schorndorfer

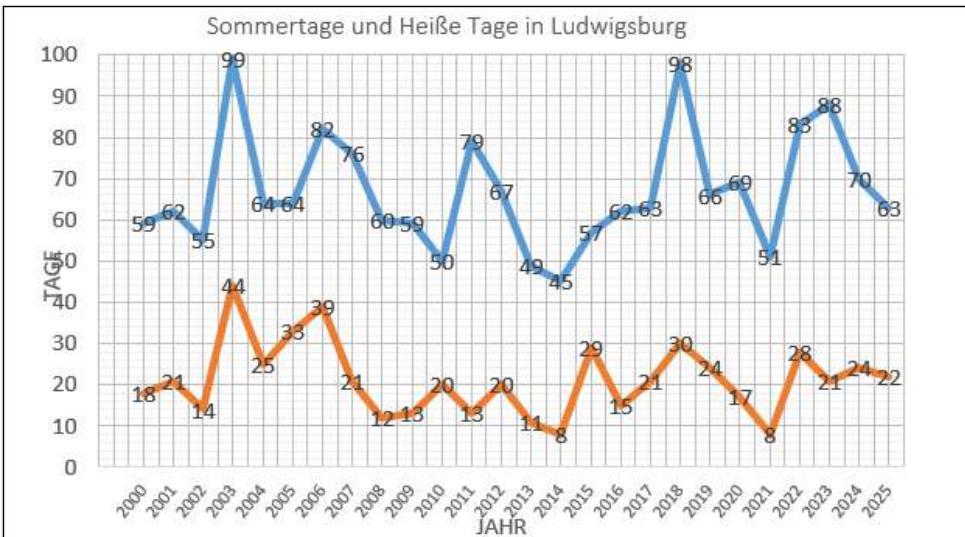
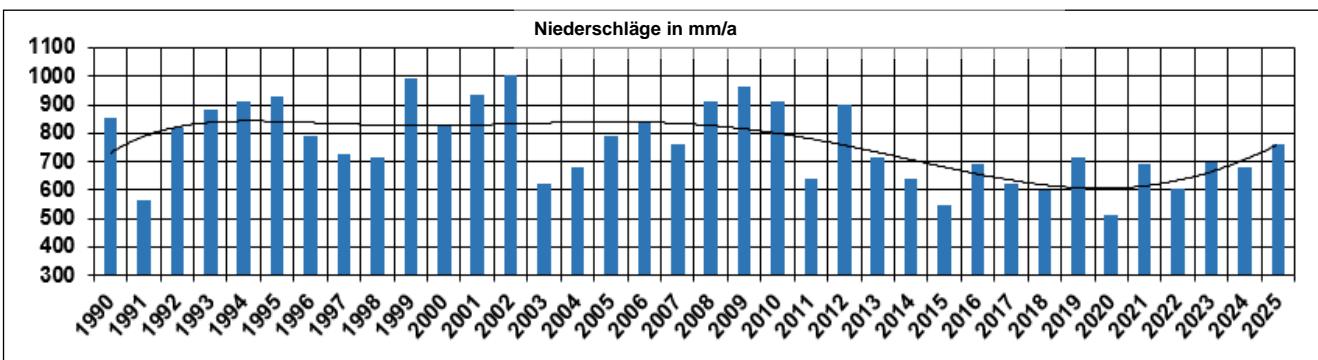
Straße ist der Flurabstand im Lettenkeuperaquifer mit etwa 2 bis 2,5 m ebenfalls gering. Durch mehrere wenig ergiebige Brunnen, z.B. Küchen- und Badbrunnen wurde der Wasserbedarf am herzoglichen Hof gedeckt. Sicherlich eine wesentliche Voraussetzung für die Standortwahl des Schlosses auf einem schmalen, Nord-Süd verlaufenden Lettenkeupersporn. Heute werden die Brunnen zur Beregnung der Parkanlagen genutzt. Für das Schloss wirkt sich der geringe Flurabstand des Grundwassers ungünstig aus. Das Grundwasser kann hier kapillar im Mauerwerk aufsteigen, beschleunigt dadurch den Steinzerfall und bewirkt eine ständig hohe Luftfeuchtigkeit in den Archivräumen im Erdgeschoss. Die umfangreichen Sanierungsmaßnahmen in früheren Jahren waren wenig erfolgreich. Weniger gut bekannt sind die Grundwasserverhältnisse in Oßweil, im Bereich Schlösslesfeld und östlich von Neckarweihingen und Poppenweiler. Dort gibt es nicht genügend Grundwassermessstellen für eine zusammenhängende Auswertung. Für zukünftige Planungen, vor allem für Baumaßnahmen in den Tälern, gibt die Karte der Grundwassergleichen in Beilage 11 und die Karte der Grundwasserflurabstände in Beilage 12 erste Auskünfte über die zu erwartenden Grundwasserverhältnisse. Während der geschlossene und frei bewegliche Grundwasserhorizont oft einige Meter unter der Geländeoberfläche liegt, steigt Wasser vom Grundwasserhorizont durch kapillare Kräfte (Oberflächenspannung, Adhäsion und Meniskusbildung) in der Bodenkrume nach oben. Je feinkörniger der Boden ist, desto höher steigt dieses **Kapillarwasser**. In sandigen Kiesen liegt die Steighöhe bei ca. 20 bis 100 cm, in Löss, Lehm und in Tonen können bis über 350 cm erreicht werden. Die **Versickerungsrate** von Regen- und Oberflächenwasser in den Lehm- und Lösslehmböden in Ludwigsburg ist oft gering. Versickerungsanlagen müssen daher sorgfältig geplant und getestet werden und es muss zur Filterung des Sickerwassers ein Sicherheitsabstand zur Grundwasseroberfläche eingehalten werden. Bei einer **gezielten Versickerung von Niederschlagswasser** ist zu beachten, dass es in den bindigen Böden zu einem temporären Wasseranstau im Untergrund kommen kann. Dann können nicht abgedichtete Untergeschosse und Nachbargebäude beeinträchtigt werden. Versickerungsanlagen sind ebenso, wie allen anderen Eingriffe in das Grundwasser, genehmigungspflichtig.



Abb. 11:
Grundwasserganglinien,
Schwankungen,
Niederschläge

Jährliche Grundwasserstände in
Brunnen und Messpeglern der ober-
flächennahen Grundwasserhorizonte
in mNN (jeweils Hoch- und Tiefstand
eines Jahres). 14-tägige Messungen.
Im Jahr 2010 wurde nicht gemessen.

Fortsetzung nächste Seite

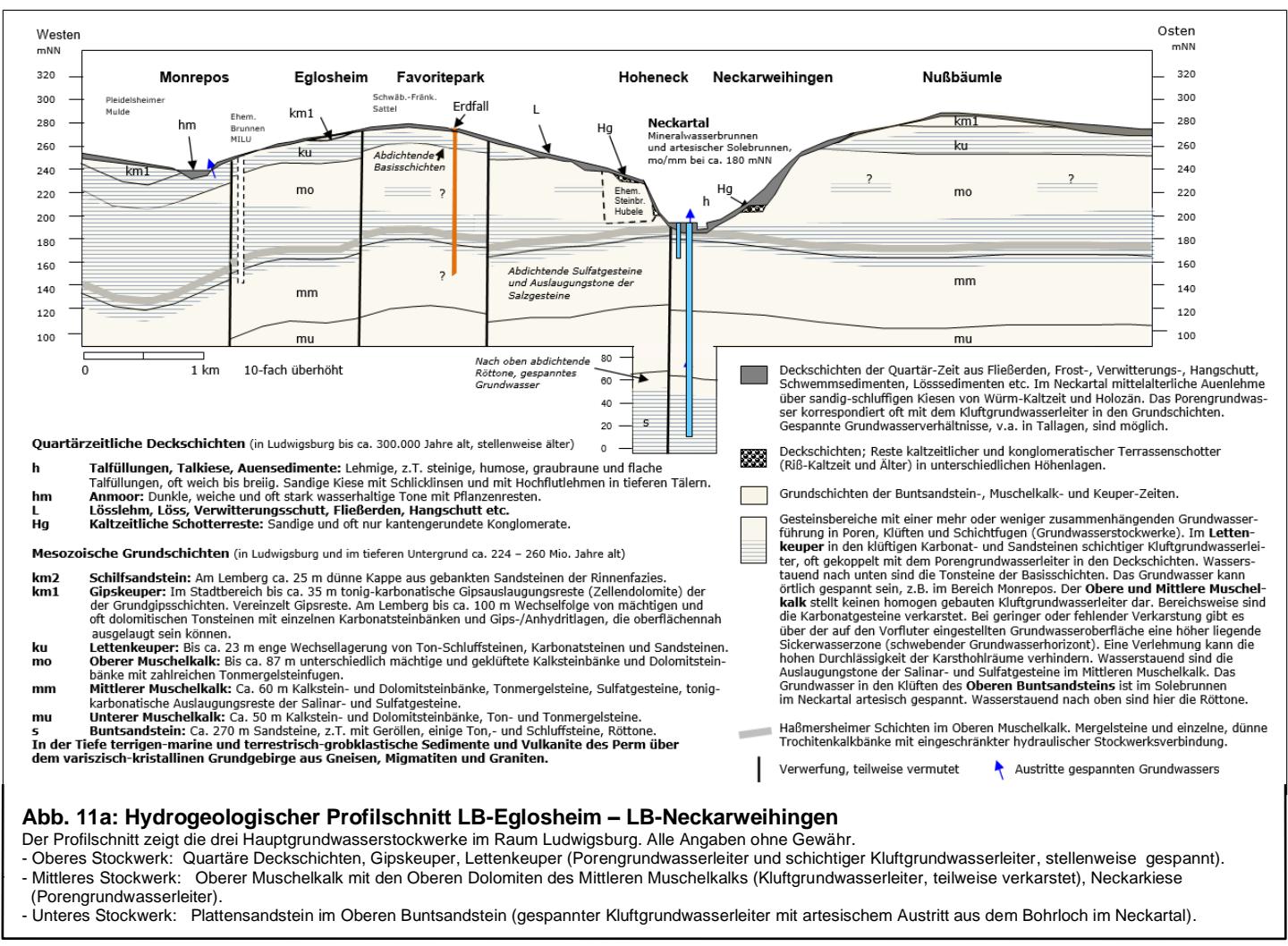


Jährliche Niederschläge in Ludwigsburg in mm

Trendline Polynom 6. Grades.
Langjähriger Niederschlagsdurchschnitt:
750 mm/Jahr.
Durchschnittstemperatur seit 2000: 11,2 °C
2025: 11,8 °C.
Quelle: Deutscher Wetterdienst und
Messstation des LTZ, Agrarmeteorologie
Baden-Württemberg.

Anzahl der „Sommertage“ (blau) und
der "Heißen Tage" (orange) in
Ludwigsburg 1998 - 2025.

Quelle: Agrarmeteorologie
Baden-Württemberg.



3.5.2 Wasserschutzgebiete, Grundwassernutzung

Auf der Gemarkung Ludwigsburg waren bis zum Jahr 2011 drei Wasserschutzgebiete rechtskräftig ausgewiesen. Im Zuge der Neckarrenaturierung wurde das große **Wasserschutzgebiet Hoheneck/Langwid** entlang dem westlichen und südlichen Neckartalhang Anfang 2012 aufgegeben. Das **Wasserschutzgebiet Elbenwiesen** liegt südlich von Poppenweiler an der Einmündung des Zipfelbachs in den Neckar und schützt dort den Grundwasserleiter im Neckarkies und im Oberen- und Mittleren Muschelkalk. Das **Wasserschutzgebiet Steinheimerstraße** liegt am ansteigenden Lemberg östlich von Poppenweiler und schützt dort den Grundwasserleiter im Lettenkeuper. Diese Grundwasservorkommen werden nicht in das Trinkwasserversorgungsnetz eingespeist, dienen aber zur Notwasserversorgung und werden jährlich durch die Stadtwerke überprüft. Der **Mineralwasserbrunnen Hoheneck**, dessen Wasser aus dem Muschelkalk über 1000 mg/l gelöste Feststoffe enthält, wird im Heilbad genutzt und steht auch der Öffentlichkeit zur Trinkwasserentnahme zur Verfügung. Zum Schutz der **Heilwassersole** aus dem Buntsandstein mit ca. 29.000 mg/l gelösten Feststoffen, die im Heilbad Hoheneck therapeutisch genutzt wird, wurde im Jahr 2009 ein "**Vorläufiges Heilquellen-Schutzgebiet**" durch das LGRB-BW abgegrenzt. Diese quantitative "Äußere Schutzzone B/1" umfasst nahezu die gesamte Markung. Das Freibad am Neckar (pleistozäner Quelltopf mit hoher Schüttung) und das Hallenbad in der Innenstadt (bis 2012) werden bzw. wurden durch Brunnen aus dem Muschelkalk bzw. Lettenkeuper mit Grundwasser versorgt, haben aber keine eigenen Schutzgebiete (Abb. 10). Alle Eingriffe in das Grundwasser (Bohrungen, Schürfe, Bauwerke, Sonden, Brunnen etc.) und Maßnahmen die in das Grundwasser oder mehr als 10 m in den Boden einbinden, bedürfen einer wasserrechtlichen Erlaubnis durch das Landratsamt Ludwigsburg.

3.5.3 Chemismus und Verunreinigungen der Grundwässer

In Beilage 19 sind einige Wasseranalysen aus den verschiedenen Grundwasserstockwerken in Ludwigsburg zusammengestellt. Die oberflächennahen Wässer weisen z.T. erhöhte **Chlorid- und Sulfatgehalte** auf, die eindeutig anthropogenen Ursprungs sind. Die erhöhten Chloridgehalte stammen oft von der Straßensalzstreuung im Winter, ein hoher Sulfatanteil deutet auf eine Belastung durch Bauschutt, Sondermüll und Industrieabwässer hin. Das Sulfat kann aber auch geogenen Ursprungs sein, z.B. vom nicht vollständig ausgelagerten Gipskeuper im Bereich Salonwald und im Bereich Monrepos. In den vergangenen Jahren ist der Sulfatgehalt im Grundwasser durch Kanalsanierungsmaßnahmen und durch Maßnahmen bei der Industrieproduktion leicht zurückgegangen. Der streusalzabhängige Chloridgehalt hängt von der Qualität der Winter ab. Gipskeuperwässer sind in Ludwigsburg im Allgemeinen nur schwach mineralisiert und nur in wenigen Fällen **betonaggressiv** (z.B. in den Bereichen Karlshöhe, Wüstenrot und Mäurach). In der Innenstadt und in der Weststadt ist das Grundwasser oft flächendeckend mit **leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (LHKW)**, z.T. weit oberhalb des Grenzwertes nach der TVO von 10 µg/l verunreinigt. Bei Bauvorhaben mit einer temporären Wasserhaltung muss dieses Grundwasser ab einer bestimmten Konzentration der Schadstoffe vor der kosten- und genehmigungspflichtigen Einleitung in die Kanalisation über ein Absetzbecken und über einen Aktivkohlefilter gereinigt werden (siehe Kap. 3.6.4). Sollten leichtflüchtige Schadstoffe aus dem Grundwasser und aus der Bodenluft in Kellergeschosse von Gebäuden eindringen, ist dort eine geeignete Abdichtung einzubauen, wie es bei der Wohnbebauung auf dem ehemaligen MLF-Gelände in der Alt-Württemberg-Allee erforderlich war (Bildtafel 14). Bei Bohrungen und Bauvorhaben, die in den Grenzbereich von Quartär/Lettenkeuper zum Oberen Muschelkalk eingreifen, ist darauf zu achten, dass mögliche Verunreinigungen des oberen Grundwasserstockwerks nicht in das darunterliegende mittlere Stockwerk des Oberen Muschelkalks verschleppt werden, und dass die beiden Hauptgrundwasserleiter unbedingt hydraulisch getrennt bleiben (Setzungsgefahr von Bauwerken etc.).

3.5.4 Erdwärmenuutzung

Erdwärme kann, wie auch die Außenluftwärme mit Wärmepumpen, zur Energiegewinnung genutzt werden. Mit zunehmender Tiefe findet in der obersten Erdkruste ab ca. 20 m Tiefe eine durchschnittliche Erwärmung von ca. 1°C je 30 m, im Raum Stuttgart je 24 m statt (geothermischer Gradient). Die genauen Werte sind je nach den geologischen Gegebenheiten aber unterschiedlich. Die Durchführbarkeit und Wirtschaftlichkeit einer Erdwärmesohle ist von den geologischen Gegebenheiten am jeweiligen Standort, von der Wärmedämmung des Gebäudes und von der technischen Ausführung abhängig.

Auf www.ludwigsburg.de gibt es **Auskünfte zur Erdwärmegewinnung auf der Gemarkung Ludwigsburg**. Die Eignung einzelner Gebiete für die Erdwärmegewinnung in Baden-Württemberg und weitere Hinweise sind in den "*Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden - LQS EWS*" und in der "*/SONG-Datei*" auf der Web-Seite des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB-BW) dargestellt. Die Bohrung und die Installation der Erdwärmesonden müssen vom Landratsamt und ab Tiefen von 100 m vom LGRB-BW genehmigt werden. Das Anbohren der sulfathaltigen Schichten im Gipskeuper und im Mittleren Muschelkalk mit Gips und Anhydrit ist in jedem Fall zu vermeiden. Aus Sicherheitsgründen werden Bohrungen oft nur bis zum Top der Haßmersheimer Mergel im Oberen Muschelkalk genehmigt. **Eine hydraulische Verbindung der Grundwasserstockwerke muss unbedingt vermieden werden. Ein naturbedingtes und technisches Bohrrisiko**, z.B. durch Lösungshohlräume und durch Erdfälle im Gestein (Mtl. und Ob. Muschelkalk), durch Grundwasserprobleme und durch quell- und lösungsfähige Gesteine (Ton, Anhydrit, Gips), ist zu beachten. Näheres dazu und Angaben zu "Grundwasser, Baugrund und Altlasten" steht in den "Infoblättern Erdwärmenuutzung ..." auf der Webseite der Stadt Ludwigsburg.

3.6 Baugrundtechnische Risikoflächen (Abb. 11b, 11c, Beilage 16, 16a)

3.6.1 Allgemeine geologische und hydrogeologische Risikoflächen

Potentiell **rutschgefährdete Bereiche** sind in Ludwigsburg bisher nur in steilen Hanglagen bekannt geworden. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass in Hanglagen mit mehr als 10 % Neigung und einer mächtigen bindigen Lockergesteinsdecke ohne Steingerüst, v.a. nach Starkniederschlägen, Rutschungen auftreten. Im Neckartal, z.B. entlang dem Otto-Konz-Weg zum Freibad, können an den sehr steilen Prallhängen kleine Rutschvorgänge beobachtet werden.

In vielen Bereichen der Gemarkung besteht in den Deckschichten **Setzungsgefahr** aufgrund bindig- und organisch-kompressibler Lockergesteine (Abb. 11c). **Die Muldenlagen und die kleinen Talzüge der Neckarzuflüsse** (Riedbach, Monrepos, Tälesbach etc.) sind oft mit setzungsempfindlichen, weichen und teils organisch durchsetzen, tonig-schluffigen Verwitterungsböden und mit Auenlehmern gefüllt. Das Grund- oder Sickerwasser steht hier oft nur 1 - 3 m unter der Geländeoberfläche. In den Bereichen "**östliche Wernerstraße, Kulturzentrum und Schlosslesfeld-Schule**" sind drei alte und tiefe plombierte Tälchen mit hochplastischen Tonen nachgewiesen worden und weitere unbekannte Tälchen dieser Art sind möglich. Bei diesen Standorten ist nur eine geringe Sohlspannung möglich und es muss mit stärkeren Setzungen gerechnet werden, oder die Gründung muss in tieferen und festeren Böden erfolgen. In den weitverbreiteten Bereichen mit **Lösssedimenten** besteht die Gefahr von Setzungen und Hebungen aufgrund von jahreszeitlichen Volumenänderungen und es können örtlich engräumig unterschiedliche Konsistenzen (weich – halbfest – weich) und Vernässungen vorkommen, was v.a. bei größeren Bauwerken eine Tiefergründung notwendig machen kann. In trockenen Sommern kann die Wasseraufnahme schon eines einzelnen Baumes in der Nähe von Gebäudefundamenten den bindigen Boden so stark austrocknen, dass Setzungsrisse und Schäden am Gebäude durch Bodenschwund möglich sind. Schrumpf- und Quellvorgänge führen bei zu flacher Gründung auch zu ungleichmäßiger Setzung oder zu Kriechvorgängen am Hang. Zur Vermeidung dieser Schäden müssen die Außenfundamente in den betroffenen Böden ausreichend tief gegründet werden. Das betrifft v.a. Bauwerke an Hanglagen, wo auch eine einheitliche Gründung in baugrundtechnisch gleichartigen Bodenschichten erforderlich ist und wo in besonderen Fällen eine statische Aussteifung des Untergeschosses erfolgen muss (Kap. 4.3.4). Bei den inhomogen tief verwitterten und veränderlich festen **Ton- und Schluffsteinen des Lettenkeupers** besteht, v.a. im nördlichen Markungsbereich, ebenfalls Setzungsgefahr und die Gefahr von Volumensänderungen. **Die Felsgesteine des Oberen Muschelkalks** und hier v.a. die Tonmergelfugen sind oberflächennah aufgelockert und vor allem in der Nähe zum Neckartal und zum Tälesbach stärker geklüftet und stellenweise verkarstet. Hier können Gründungsprobleme in Verbindung mit lehmgefüllten Spalten auftreten (z.B. Marstallcenter). **Im Bereich von Verwerfungs-zonen** kann es in den Grundsichten zu sich engräumig und rasch verändernden Baugrundverhältnissen kommen.

Bekannte Bereiche mit geringem Grundwasserflurabstand < 2 m oder 2 - 5 m sind in Beilage 12 dargestellt. Bei Bauwerken, die in oder nahe am Grundwasser stehen, muss das Untergeschoss druckwasserdicht und auftriebssicher und ggf. mit horizontale Drainagen zur Grundwasserumläufigkeit ausgeführt werden. Bei kurzzeitig hoch anstehendem Grundwasser ist zusammen mit der Wasserbehörde beim Landratsamt im Rahmen eines wasserrechtlichen Erlaubnisverfahrens der **Bemesungswasserstand** zu erheben. Das ist der innerhalb der Nutzungsdauer höchste zu erwartende Grundwasserstand mit Sicherheitszuschlag unter Berücksichtigung langfristiger Beobachtung (DIN EN 1997-1). Temporär wirksame Sicherheitsdrainagen in die Kanalisation sind genehmigungs- und gebührenpflichtig, siehe dazu Kapitel 4.5.1: "Bauen im Grundwasser". Eine dauerhafte Absenkung und Ableitung von Grund-, Sicker- und Stauwasser über Drainagen in die Kanalisation ist nicht zulässig.

3.6.2 Erdfälle und Lösungshohlräume

Die Muschelkalk-Gäuflächen in Baden-Württemberg mit den teilweise tief eingeschnittenen Tälern, so auch die Gemarkung Ludwigsburg, sind verkarstet und sind **Erdfallgebiete der Klassen B1, B2, B3.b** (auslaugungsfähige Gesteine im tieferen Untergrund, Karbonat-, Sulfat-, Chloridkarst, Erdfälle und Karststrukturen). In den Hangbereichen des Neckartals und auf der Muschelkalk/Lettenkeuper/Gipskeuper-Gäufläche im Raum Ludwigsburg sind in Poppenweiler in der Alten Steige (Bildtafel 11), am Kugelberg bei Hoheneck, im Favoritepark bei der Hirschquelle (Bildtafel 12) in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten Erdfälle aufgetreten und es wurden mehrere erdfallartige Verkarstungsscheinungen mit einem digitalen Geländemodell kartiert (Abb. 11b, Beilage 16, 16a, Kartenviewer IGHK50 des LGRB-BW). Erdfälle entstehen hier durch die Auslaugung der Karbonatgesteine im Oberen Muschelkalk und durch die Auslaugung der tiefer liegenden Sulfatgesteine im Mittleren Muschelkalk (Gips und Anhydrit, die Salze sind schon ausgelaugt). Es kommt dann zum Durchbrechen der schlotartigen Auslaugungshohlräume durch den Oberen Muschelkalk, durch die überdeckenden Lettenkeuper- und Gipskeoperschichten und durch die quartären Deckschichten bis an die Erdoberfläche. Die oft mit lehmig-steinigen Versturzmassen plombierten Erdfälle und andere Karsterscheinungen sind nicht immer sofort erkennbar und können Baugrundprobleme durch Ausspülungen und Setzungen verursachen. In den lockeren gelagerten quartären Deckschichten kann im Löss und in Lehmen **Suffusion und Subrosion** vorkommen. Bei Bohrungen und bei Bauvorhaben kann es zum Antreffen von aktiven Erdfällen, plumbierten Erdfällen und größeren Kluft-, Lösungs- und Subrosionshohlräumen kommen. Hier ist eine besondere Sorgfalt bei Bohrungen, bei Gründungen und bei der Abdichtung gegen das Grundwasser (hydraulische Stockwerkstrennung etc.) erforderlich. Gegebenenfalls ist auch ein Abbruch der Arbeiten erforderlich und die Fachbehörden LRA und LGRB-BW sind hinzuzuziehen. Man muss auch in Zukunft mit dem Auftreten von Erdfällen und mit anderen Hohlräumen auf dem gesamten Markungsgebiet rechnen. Orts- und Zeitangaben sind hier nicht möglich. Im Gipskeuper westlich des Neckars sind die Sulfat bis auf wenige Reste ausgelaugt und östlich des Neckars sind sie oberflächennah ausgelaugt. Hohlräume wurden im Gipskeuper in Ludwigsburg bisher nicht festgestellt, aber viele Gipskeuperbereiche in Baden-Württemberg, z.B. im benachbarten Korntal, sind Erdfallgebiete (C2.b und .c, Sulfatkarst).

3.6.3 Steinschläge und Felsabbrüche

An den **Prallhängen der Neckarschleife** zwischen Poppenweiler und Neckarweihingen ist es immer wieder zu Steinschlägen und Felsabbrüchen, auch in Zusammenhang mit Starkniederschlägen gekommen. Die Weinbergbereiche unter dem stark zerklüfteten Muschelkalk-Felskranz nördlich und nordöstlich der Neckarschleuse sind auf der ganzen Länge steinschlaggefährdet. Tonnenschwere Blöcke haben immer wieder die Weinberge beschädigt und sind bis auf den Fahr- und Fußweg gestürzt. Zur Sicherung vor diesen lebensgefährlichen Verhältnissen wurde im Jahr 2003 entlang des Weges ein Fangzaun errichtet. Die privaten Weinbergbereiche oberhalb dieser Sicherung sind aber nach wie vor stark gefährdet. Entlang der **L1100 zwischen Neckarkraftwerk und der Gemarkungsgrenze zu Marbach** stürzen immer wieder Baumstämme den Steilhang zur Straße hinab. Entlang dem **Otto-Konz-Weg** zwischen Neckarbrücke und Freibad kommt es zu Steinschlägen und zum Absturz von Baumstämmen. Trotz regelmäßiger Beräumung und Sicherung ist mit weiteren Stein- und Baumschlägen und mit einer Gefährdung der den Weg benutzenden Fahrzeugen und Personen zu rechnen. Am **Burgweg in Hoheneck** nördlich der Burg, am **Feldweg in der Sommerhalde in Poppenweiler**, am Fußweg zum **Grünpark Hungerberg** und im Bereich des **Tierheims Hoheneck** kam es ebenfalls zu Steinschlägen im Bereich der Schichten des Oberen Muschelkalks und des Lettenkeupers. Hier mussten zum Teil aufwändige Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen durchgeführt werden (Beilage 17, Tafel 1 bis 4).

3.6.4 Schadstoffbelastungen in Böden, Bodenluft, Grundwasser und in der Bausubstanz, Entsorgung

Auf Gewerbe, Industrie- und Militärflächen, auf ehemaligen Müllplätzen, in Auffüllungen, aber auch in Wohngebieten können Schadstoffbelastungen im Boden, in der Bodenluft, im Grundwasser und in der Bausubstanz durch Umschlag, Lagerung und Verarbeitung von schadstoffhaltigen Flüssigkeiten und von Feststoffen vorhanden sein. Auch **Kleingewerbe**, wie z.B. ehemalige chemische Reinigungen, ehemalige Tankstellen oder Reparaturwerkstätten, haben schon zu teuren Boden-, Grundwasser- und Gebäudesanierungen geführt. In **urbanen Räumen** liegt auf vielen Grundstücken eine mehr oder weniger mächtige Schicht aus Auffüllungen, z.B. sandig-toniger Schotter mit teerhaltiger Schwarzdecke, Abbruchschutt, Müll und fremder Erdaushub. In vielen dieser Auffüllungen findet man geringe bis mittelstarke und auch starke Schadstoffgehalte, die ein Bauvorhaben verzögern und verteuern können. Selbst harmlos aussehende Auffüllungen, z.B. zur Geländenivellierung, können Schadstoffe enthalten. Manche Verunreinigungen reichen oder versickern bis in das Grundwasser und werden mit dem Grundwasserstrom weiter verfrachtet. Bei Verdacht und bei konkreten Anhaltspunkten können die Wasser- und Gesundheitsbehörden eine aufwendige Erkundung und ggf. eine Sanierung solcher Altlasten-Standorte fordern. Bei einer **Neubebauung**, bei einem **Umbau** oder beim **Abriss von Bauwerken** kann es wegen der Schadstoffe im Boden, in der Bodenluft, im Grundwasser und in der Bausubstanz und Ausstattung älterer Gebäude zu erheblichen Mehrkosten und zu Bauverzögerungen kommen. Eine Wohnbebauung auf einem ehemaligen Müllplatz ist in der Regel nicht zulässig. Auf ehemaligen Industrie- und Gewerbeblächen müssen manchmal aufwendige Boden(luft)reinigungen und/oder ein Bodenaustausch und eine Grundwassersanierung durchgeführt werden um gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse zu garantieren und um die Werthaltigkeit der Immobilie nicht zu gefährden. Auch auf **Freiflächen, Feldern und auf Wiesen** wurden schon Auffüllungen mit Schadstoffen oder Pestizide im Boden und im Grundwasser angetroffen. Dasselbe gilt für ehemalige **Kleingartenanlagen**, auf denen oft eine überraschende Vielfalt an Schadstoffen, v.a. in den Gartenhütten, auf Wegen, auf Terrassen und bei Einfassungen von Pflanzungen, zu finden ist.

Die Bundesregierung und die Regierungen der Länder haben Gesetze und Verordnungen zum Boden- und Grundwasserschutz erlassen, in denen die Schadstoffgrenzwerte schutzwert- und nutzungsbezogen geregelt sind (Bundesbodenschutzgesetz etc.). Bei Wohn- und Industriebauten müssen **gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse** garantiert werden. Bei Freizeitanlagen und Kinderspielplätzen gelten besonders niedrige Schadstoffgrenzwerte. Nach § 9, Abs. 5, Ziff. 3 **Baugesetzbuch** "...sollen Flächen, deren Böden erheblich mit umweltgefährdenden Stoffen belastet sind, im Bebauungsplan gekennzeichnet werden". Auch wenn keine Kennzeichnung im Bebauungsplan vorliegt oder nicht erforderlich ist, muss auf solchen Flächen mit dem Auftreten von Boden- oder Grundwasserverunreinigungen gerechnet werden. **Daraus leitet sich eine hohe Sorgfaltspflicht für die planende Behörde, aber auch für den Bauherren und für seinen Planer ab.** Um Komplikationen wie Verzögerungen, Kostensteigerungen, Wertverluste und Vermarktungsprobleme zu vermeiden, sollten bei Kaufinteresse für Immobilien und bei Planungen von Bauvorhaben im Bereich ehemaliger oder aktuell betriebener Industrie-, Gewerbe- und Militärstandorte, bei Altbauten und im Bereich von Kleingartenanlagen, Müllablagerungen und sonstiger Auffüllungen frühzeitig und am besten vor dem Kauf geeignete Recherchen und Schadstofferkundungen und ggf. -sanierungen durchgeführt werden. Für die Erhebung der Aktenlage, z.B. beim Landratsamt, beim Gewerbeaufsichtsamt und in den Bauakten der Stadtverwaltung etc. ist bei privaten Bauvorhaben der Bauherr bzw. dessen Planer und Architekt zuständig. Auf eine rechtssichere Regelung der Haftung beim Abschluss eines Kaufvertrages für ein Grundstück, für eine bestehende oder noch zu bauende Immobilie und allgemein auf die komplexe juristische Seite der Altlastenfrage wird hingewiesen. In der Ludwigsburger Innenstadt und in der Weststadt mit dem Industriegebiet sind das Grundwasser und die Bodenluft stellenweise oder flächendeckend erheblich mit leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (LHKW) verunreinigt. Das kann bei einer notwendigen Wasserhaltung während der Bauzeit und wegen einer ggf. erforderlichen und dauerhaften Untergeschoss-Abdichtung zur Vermeidung einer Ausgasung von leichtflüchtigen Schadstoffen aus dem Boden in die Kellerräume zu Bauverzögerungen und zu hohen Mehrkosten führen. Sollten bei der Bauwasserhaltung Grenzwerte überschritten werden, ist das Grundwasser vor der genehmigungs- und kostenpflichtigen Einleitung in die Kanalisation über Aktivkohlefilter und Absetzbecken zu reinigen. Im Bereich um den Salonwald und Monrepos kann **betonangreifendes Grundwasser (Sulfat)** angetroffen werden (DIN 4030). **Bekannte Altlastenflächen und Verdachtsflächen** auf der Gemarkung Ludwigsburg sind im "Altlasten- und Bodenschutzkataster" des Landratsamts Ludwigsburg verzeichnet und bewertet und können dort im Rahmen der Datenschutzverordnungen eingesehen werden. Im "Altlastenkataster" der

Stadtverwaltung Ludwigsburg sind bekannte kontaminierte Flächen und Verdachtsflächen auf stadteigenen Grundstücken verzeichnet (siehe Beilage 15). Die Altlastenkataster von Stadt und Landkreis können aber **keine vollständige Erhebung** darstellen. Es muss auch mit Kontaminationen auf Flächen und an Gebäudeteilen gerechnet werden, die nicht in diesen Katastern verzeichnet sind. Auch noch aktive Produktionsstandorte mit möglichen Kontaminationen von Boden, Bodenluft, Grundwasser und Gebäudeteilen und viele Auffüllungen sind hier oft nicht verzeichnet.

Bei der Entsorgung von **schadstoffhaltigem Aushub und Abbruchmaterial**, wie z.B. **mineralische Bau- und Abbruchabfälle, Straßenaufbruch, Bodenaushub, Baggergut, Gleisschotter sowie bei Abfällen aus der Produktion**, wie z.B. **Schlacken aus der Metallerzeugung und Aschen aus thermischen Prozessen etc.** gilt das Gebot "**Verwertung vor Beseitigung (Deponierung)**". So soll wertvoller und knapper Deponieraum geschont werden. Auch Böden ohne anthropogene Schadstoffbelastungen können Entsorgungsprobleme verursachen. So kann ein erhöhter **Gehalt an organischen Stoffen durch Humus- und Wurzelreste** oder **geogen bedingtes Sulfat** im Boden zu Mehrkosten bei der Entsorgung des Baugrubenaushubs führen. Bei einer erhöhten Belastung von Aushub- oder Abbruchmaterial mit Schadstoffen aus Auffüllungen oder aus gewerblichen Vornutzungen, wie es oft in urbanen Räumen vorkommt, kann die Wiederverwertbarkeit und Einbaufähigkeit, z.B. beim Schutzgut Grundwasser, eingeschränkt und nur unter bestimmten Gegebenheiten zulässig sein. Wird eine bestimmte Schadstoffhöhe überschritten, muss das Material entweder zu Wiederverwertung gereinigt oder auf einer zugelassenen Deponie endgelagert werden. Eine temporär schlechte Marktsituation bei der Verwertung von Aushub- und Abbruchmaterial kann dazu führen, dass eine teure Deponierung von an sich verwertbarem Material nicht zu vermeiden ist. Hier bestimmt auch der Transportweg das Vorgehen. Schon der Aushub einer 15 x 15 m Baugrube kann Entsorgungskosten von einigen Zehntausend Euro verursachen. Das Risiko, das von diesen Verunreinigungen ausgeht, muss durch geeignete Erkundungen vor Baubeginn abgeschätzt werden. Je nach Art und Umfang der Verunreinigungen kann die Vorerkundung eines Grundstücks durch Baggerverschüttungen oder Rammkernsondierungen im Raster oder die Erkundung von alter Bausubstanz durch Einzelproben nicht mehr ausreichend für die endgültige Einstufung zur Verwertung oder Deponierung sein. Dann müssen der belastete Boden und die Bausubstanz nach dem Aushub bzw. Abbruch **in Haufwerken zwischengelagert** und für die endgültige Einstufung zur Verwertung oder Deponierung nochmals repräsentativ beprobt und analysiert werden. Diese Haufwerksbildung kann auf einer Baustelle Platz- und Zeitprobleme mit sich bringen und Mehrkosten verursachen. Die Raster-Voruntersuchungen liefern aber wichtige Hinweise über die zu erwartenden Verunreinigungen und sind für Kosten- und Zeitabschätzungen und bei Verhandlungen von Kaufverträgen unverzichtbar. Der ökologische wertvolle und stark humushaltige **Mutterboden** darf dem Naturkreislauf nicht verloren gehen und muss beim Aushub für das Bauvorhaben abgeschieden, ggf. zwischengelagert und an geeigneter Stelle wieder fachgerecht eingebaut (verwertet) werden (Kap. 2.3).

Ersatzbaustoffverordnung

Den rechtlichen Rahmen für die **Verwertung und Beseitigung von mineralischen Abfällen** zum Schutz von Boden und Grundwasser bilden neben dem „**Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz**“ und dem „**Bundesbodenschutzgesetz**“ die am 01.08.2023 in Kraft getretene „**Mantelverordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung**“. Kernstück ist hier die „**Ersatzbaustoffverordnung**“ (EBV) als Artikel 1 der Mantelverordnung. Damit wird eine bundeseinheitliche und rechtsverbindliche Vollzugspraxis für die Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken geschaffen. Geregelt wird die Verwertung bzw. der Einbau von z.B. mineralischen Bau- und Abbruchabfällen, Recyclingbaustoffen, Straßenaufbruch, Bodenaushub, Baggergut, Gleisschotter sowie Schlacken aus der Metallerzeugung und Aschen aus thermischen Prozessen etc. Die Beseitigung (Deponierung) der zur Verwertung ungeeigneten o.g. „mineralischen Bau- und Abbruchabfälle und Böden etc.“ regelt unter anderem die „**Deponieverordnung**“ Die Materie ist komplex, auch weil die neuen Verordnungen noch nicht aufeinander eingespielt sind und wegen Ausnahmen und Übergangsregelungen. Die Erkundungs- und Entsorgungsmaßnahmen müssen von einem qualifizierten Fachgutachter geplant, bearbeitet, begleitet und dokumentiert werden.

Künstliche (anthropogene) Auffüllungen in der Baugrundkarte

Künstliche Auffüllungen kommen nahezu überall in urbanen Siedlungsräumen und auch auf Feldern und Wiesen vor. In Ludwigsburg sind die Gewerbegebiete, Straßennbereiche, Bereiche in Wohngebieten und auch Teile der Feld- und Wiesenflur mit künstlichen Auffüllungen in unterschiedlicher Mächtigkeit bedeckt. Auch ehemalige Lehm-, Sand- und Kiesgruben, einige Hohlwege und Erosionsklingen und ehemalige militärische Stellungen und Bombentrichter wurden in der Vergangenheit mit Haus- und Gewerbemüll, Bauschutt und Erdaushub verfüllt. Auffüllungen sind mit Ausnahme bei verdichteten Straßen- und Bahndämmen in der Regel heterogen zusammengesetzt, meistens locker gelagert, haben eine ungünstige Konsistenz der bindigen Anteile und setzen sich oft stark und uneinheitlich. Sie bestehen vielfach aus natürlich entstandenen, mineralischen Lockergesteinen, die als bindiger oder fein- und gemischtkörniger Bodenaushub zur Geländemodellierung und zur Bodenverbesserung abgelagert wurden. Wie schon ausgeführt wurde, treten in den Auffüllungen oft auch organische Reste (Torf, Humus), Baurestoffe, Steine und Betonteile, teerhaltiger Straßenaufbruch, Schlackenreste, Gewerbemüll und Hausmüll etc. auf, die bei Aushubmaßnahmen Verzögerungen und hohe Entsorgungskosten verursachen können. In zwei Fällen wurde in Ludwigsburg eine Fliegerbombe gefunden. In diesem Zusammenhang wird auch auf die unbedingt zu empfehlende **Kampfmittelerkundung** vor allen Eingriffen in den Untergrund hingewiesen (Kap. 3.6.5). Soweit die Auffüllungen bekannt sind, sind sie bei Mächtigkeiten von über 2 m in der **baugrundgeologischen Karte** eingezeichnet, ihre Abgrenzung ist aber unsicher. Die Darstellung der Auffüllungen muss daher als "nicht vollständig" betrachtet werden. Bei Bauvorhaben im Bereich von Auffüllungen müssen diese auf Schadstoffe und auf ihre bodenmechanischen Eigenschaften untersucht und zu mindestens unter den Fundamenten

ausgeräumt und durch Füllbeton oder Siebschutt ersetzt werden. In manchen Fällen kann eine Sondergründung in Form von Pfählen etc. notwendig werden. Besteht der Baugrund aus einem gesättigten und bindigen Boden unter einer kohäsionslosen, dünnen Deckschicht (Auffüllung), kann die Gefahr eines **Durchstanzen des Fundamente** mit Grundbruch bestehen.

Folgende größere und in der Regel nicht verdichtete Auffüllbereiche sind bekannt:

- Ehemalige Steinbrüche im Hohenecker Kalk und Oberen Muschelkalk (z.B. Kugelberg, Mäurach, Steinbruch Hubele), kleine Steinbrüche nordöstlich von Oßweil und bei Poppenweiler und Neckarweihingen.
- Klingen zum Neckartal östlich von Neckarweihingen (Hörnle) und Poppenweiler Halde.
- Ehemalige Ziegeleigruben (südlich der Kammererstraße, beim Stadionbad nördlich der Marbacher Straße, Gewann Hartenecker Feld).
- Ehemalige Kies- und Sandgruben im Neckartal bei Neckarweihingen und Poppenweiler.
- Talsenken, u.a. Tälesbach und Feuersee im Stadtzentrum mit benachbarten Aufschüttungen in der Myliusstraße als Folge des Eisenbahnbaus vor 150 Jahren.
- Sportplätze, Bahngelände, Industrieanlagen und ehemalige Kasernen.
- Ehemalige Hohlwege westlich von Pflugfelden und zwischen Oßweil und Schlosslesfeld.

Im Kartenviewer des LGRB-BW gibt es eine Ingenieurgeologische Gefahrenhinweiskarte (IGHK50).

<https://geogefahren.lgrb-bw.de/>

3.6.5 Kriegsschäden, Kampfmittel, Luftschutzstollen, alte Kellerräume

Während des 2. Weltkrieges kam es auch über Ludwigsburg zu zahlreichen Bombenabwürfen. Im Jahr 1995 hat das Stadtmessungsamt der Stadtverwaltung ein Kartenwerk der "**Fliegerschäden in Ludwigsburg im 2. Weltkrieg**" ausgearbeitet, in dem die Lage der bombardierten Bereiche mit den bekannten Treffern dargestellt ist (einzusezern beim Fachbereich Stadtplanung und Stadtmessung). Diese Karten zeigen stellenweise stärkere Bombardierungen des Stadtgebiets und vieler Außenbereiche. **Blindgänger** sind hier aber nicht dargestellt!

Für die Kampfmittelfreiheit eines Baugrundstücks ist der Bauherr verantwortlich. Vor dem Beginn von Baugrund- und Altlastenuntersuchungen und vor allen in den Boden eingreifenden Arbeiten muss daher eine Untersuchung des betreffenden Grundstücks auf mögliche Kampfmittel im Boden durch den Kampfmittelbeseitigungsdienst des RP-Stuttgart oder durch ein qualifiziertes privates Fachbüro durchgeführt werden. Zunächst werden dazu alte **Luftbilder der Alliierten** ausgewertet. Werden keine "Verdachtsmomente" gefunden, gibt es eine „Freigabe ohne Gewähr“. Das bedeutet, dass das Vorhandensein von Explosivstoffen, z.B. von Kleinmunition, nicht ganz ausgeschlossen werden kann. Bei Blindgängerverdacht muss eine geophysikalische und bohrtechnische Freimessung und ggf. eine Begleitung der Aushubmaßnahmen durch eine nach §§ 7 und 20 Sprengstoffgesetz zertifizierte Fachfirma vor Ort stattfinden (ATV DIN 18323). Auch bei leichten Verdachtsmomenten, z.B. bei ehemaligen Kasernen und Übungsplätzen etc., ist eine fachliche Einweisung des Baupersonals erforderlich.

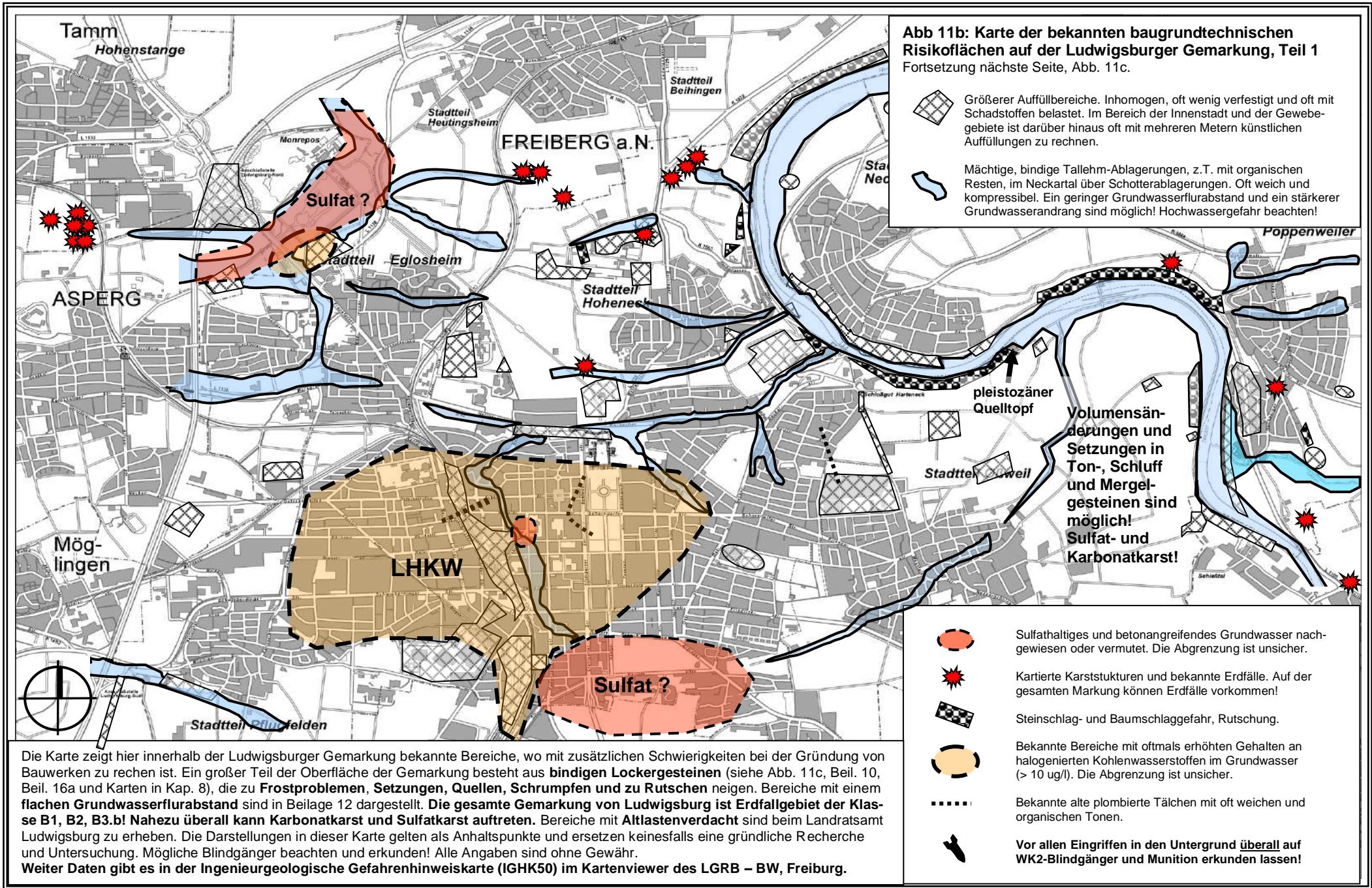
Im 2. Weltkrieg wurden in Ludwigsburg etwa **30 Luftschutzstollen** gebaut. Die Mehrzahl von ihnen wurde mit einem dünnflüssigen Kiessand-Zementmörtel-Gemisch von Überlage verfüllt. Die Zuverlässigkeit dieser Verfüllungen ist aber nicht garantiert. In Neckarweihingen ist in die nördliche Böschung der Lechtsteige ein Stollen mit Rechteckprofil in die mächtigen Lössablagerungen gegraben worden, der anscheinend auch nach dem Entfernen des Holzverbaus seit 80 Jahren besteht. Dennoch sind solche Stollen **immer einsturzgefährdet**. Die Lage der bekannten Stollen wurde in die Originale der Baugrundgeologischen Karten im Maßstab 1: 5000 übertragen. **Mit dem Auftreten bisher unbekannter Stollen und mit alten und tief liegenden Kellerräumen im Untergrund ist immer zu rechnen** und es ist in Ludwigsburg auch schon vorgekommen. Sollten diese nicht erkannt und überbaut werden, kann es zu Setzungen und Einbrüchen mit Bauschäden kommen. Die Erkundung und ggf. Sanierung dieser Hohlräume obliegt dem Bauherrn und auch hier ist vor einem Grundstückskauf eine sorgfältige Recherche zu empfehlen.

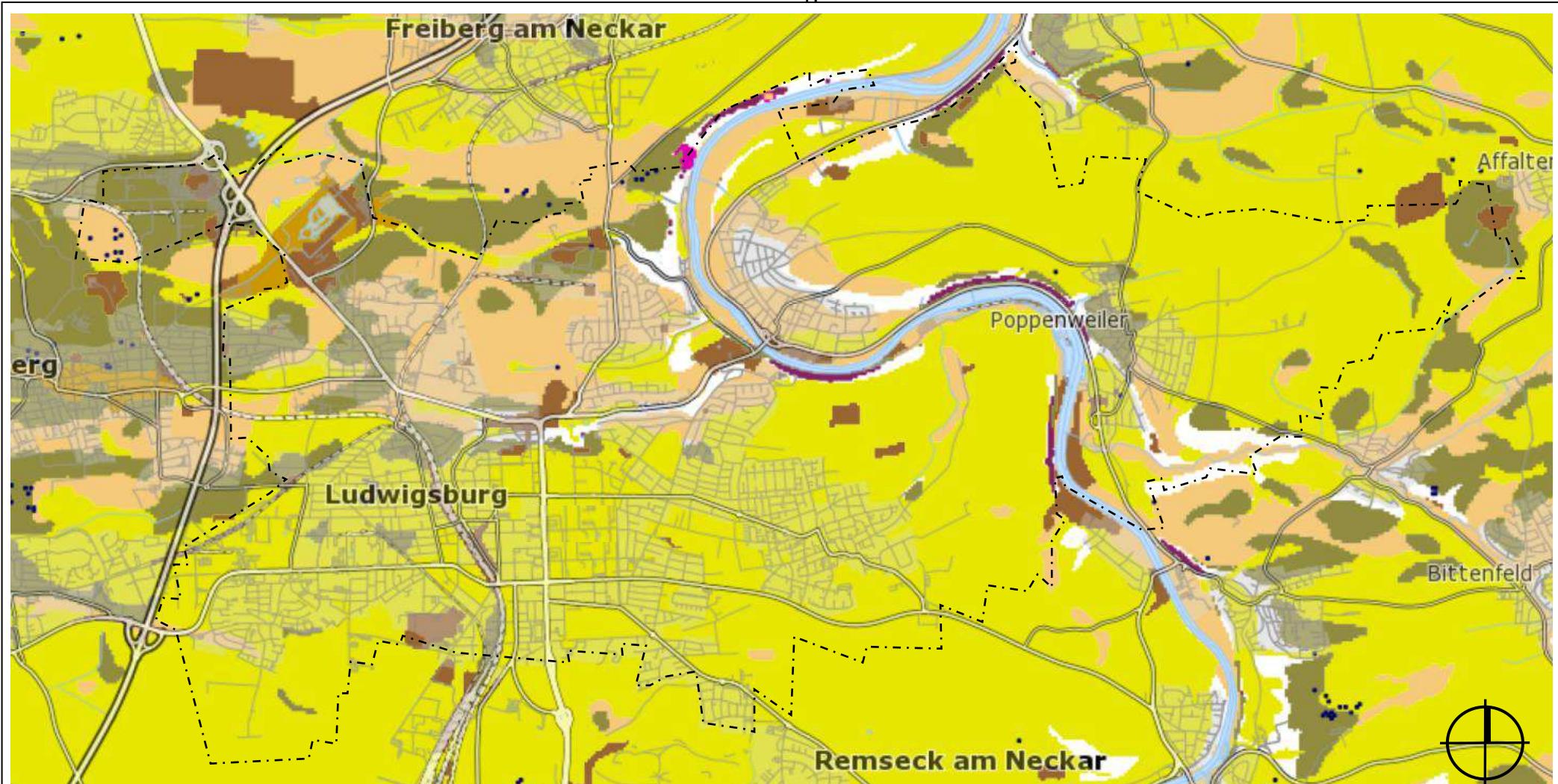
Weiter Daten, Tabellen, Kennwerte, Karten, Profilschnitte etc. zum Baugrund in Ludwigsburg gibt es in

- Kapitel 5: Tabellen

- Kapitel 6: Beilagen und Bilder

- Kapitel 8: Baugrundgeologische Karte





Gefahr von Setzungen und Hebungen aufgrund von jahreszeitlichen Volumenänderungen.

Setzungsgefahr aufgrund anthropogener Auffüllungen.

Setzungsgefahr aufgrund bindiger, kompressibler Lockergesteine.

Setzungsgefahr aufgrund organischer, kompressibler Lockergesteine.

Uneinheitliches Setzungsverhalten aufgrund anthropogener Auffüllungen

Veränderlich feste Gesteine vorhanden, v.a. im Lettenkeuper.

Rutschungsgebiete nach geologischer Karte und nach Fernerkundung.

Bekannte und digital karte Karstrstrukturen.

Potentielle Ausbruchgebiete für Steinschlag und Felssturz.

Abb. 11c: Karte der bekannten baugrundtechnischen Risikoflächen auf der Ludwigsburger Gemarkung, Teil 2

Quelle: Kartenviewer des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), Baden-Württemberg, Ingenieurgeologische Gefahrenhinweiskarte (IGHK50).

4. Einführung in die Baugrundkunde

Es folgt eine Einführung und Übersicht zu wichtigen Begriffen und Zusammenhängen der Baugrundkunde. Einzelheiten können in der Fachliteratur vertieft werden. Alle Angaben sind ohne Gewähr!

4.1 Festigkeit von Boden und Fels

Der Baugrund kann nach DIN 1054, DIN 4022, DIN 4023, DIN EN ISO 14688 und 14689 in **Festgesteine (Fels)**, in **veränderlich feste Gesteine (Halbfestgesteine)** und in **Lockergesteine (Boden im baugrundtechnischen Sinne)** eingeteilt werden. Die oberste **humose Bodenschicht (Mutterboden)** ist für Gründungen nicht geeignet, wird bei allen Bauvorhaben abgetragen und entsprechend den Bodenschutzvorschriften wiederverwendet. Die Festigkeit und das Verhalten von Boden (Bodenmechanik) und Fels (Felsmechanik) sind wichtige Größen bei Bauvorhaben und können sehr unterschiedlich sein.

Boden und Fels bestehen in der Regel aus 3 Substanzen:

- Festmasse - Kornphase
- Wasser - flüssige Phase
- Luft - gasförmige Phase

Bei einem vollkommen wassergesättigten Boden liegt ein Zweiphasensystem vor, bei nur teilweiser Sättigung ein Dreiphasensystem.

4.1.1 Festgesteine

Bei Festgesteinen muss zwischen **Gestein** und **Fels** bzw. **Gebirge** unterschieden werden. Gestein in der Größenordnung einzelner Kluftkörper besitzt andere Eigenschaften als Fels im Gebirgsverband. Fels ist in der Regel mineralisch fest gebunden aber inhomogen und anisotrop. Gebirgseigenschaften können daher nur für einen bestimmten Gültigkeitsbereich, dem sog. Homogenbereich angegeben werden. Festgesteine werden i.d.R. von Trennflächen (Schichtfugen, Klüfte) in unterschiedlichen Abständen durchzogen, die maßgeblich die Eigenschaften (Festigkeit, Lösbarkeit, Gleitfähigkeit) dieser Gesteine mitbestimmen. Sedimentäre Festgesteine werden durch mineralische Bindemittel (Kieselssäure (Quarz), Karbonate, Tonminerale (Grauwacken), Eisenverbindungen (Limonit, Hämatit, Siderit etc.)), zusammengehalten. Karbonatsteine (Kalke, Dolomite, Mergel) können Anteile an Kohlenwasserstoffen von verrottenden Kleinstlebewesen enthalten (ölige, organische Substanzen, H₂S, bituminöser Karbonatstein, Ölschiefer). Festgesteine sind in viele Fällen ein günstiger, aber widerstandsfähiger und aufwendig auszuhedender Baugrund. Im Folgenden wird der Schwerpunkt auf die veränderlich festen Gesteine und auf die Lockergesteine gelegt, deren Baugrundeigenschaften sehr unterschiedlich und auch kritisch sein können.

Die Beschreibung der Festgesteine erfolgt in der Regel nach der geologischen Benennung und den folgenden Kriterien:

- Gesteinsart (Zusammensetzung, Korngröße, -anordnung, -verteilung, -bindung).
- Verwitterungszustand und Verwitterungstiefe (z.B. unverwittert, angewittert, verwittert, zersetzt).
- Schichtung und Art und Klassifizierung der Trennflächen (Klüfte, Schichtflächen, Schieferungsflächen).
- Härte und Festigkeit.
- Beständigkeit gegenüber Atmosphärierilien (Erweichbarkeit, Löslichkeit, Quellbarkeit und andere Mineralumwandlungen).

4.1.2 Veränderlich feste Gesteine, Halbfestgesteine

Ein körniges Festgestein hat mineralische Bindungen durch karbonatisches, kieseliges, ferritisches und seltener toniges Bindemittel und darf nach DIN EN ISO 14689-1 bei 24-stündiger Wasserlagerung keine Veränderungen zeigen. Eine exakte und praxisnahe Definition nach DIN EN ISO 14688 und 14689 gibt es aber nicht. Gesteine, die bei Wasserlagerung Veränderungen zeigen, werden als **veränderlich feste Gesteine** oder **Halbfestgesteine** bezeichnet. Der DIN-Versuch sagt jedoch nichts über das Langzeitverhalten dieser Gesteine aus. Im Gegensatz zu den "echten Festgesteinen" verlieren die in frischem Zustand noch festen (Halbfest)gesteine nach der Freilegung ihre festen Eigenschaften, v.a. bei Feucht-/Trockenwechsel und unter Einfluss von Atmosphärierilien auch noch innerhalb von Tagen bis wenigen Jahren. Sie verwittern zu feinkörnigen oder gemischtkörnigen Verwitterungsmassen (siehe Kap. 4.2.7). Dieser Festigkeitsverlust (Verlust der Kohäsion, zusammenhaltende Kräfte zwischen den einzelnen Körnern) ist im Gegensatz zu den vieler bindiger Lockergesteine nicht reversibel. Die leicht verwitterbaren Halbfestgesteine stellen bezüglich ihres Verhaltens ein Zwischenglied zwischen den bindigen Lockergesteinen und den dauerhaft festen und verwitterungsresistenten Gesteinen dar. Die Grenzen der Gesteinsgruppen können fließend sein. Halbfestgesteine sind in Süddeutschland und im Raum Ludwigsburg weit verbreitet. Zu ihnen gehören Tonsteine, Schluffsteine, Mergelsteine, Kalkmergelsteine, bindemittelarme oder tonig gebundenen Sandsteine und einige Tiefen- und Ergussgesteine. Veränderlich feste Gesteine werden nach DIN EN 14689 -1 in die **Veränderlichkeitsklassen nach Nickmann** 1 = „nicht veränderlich“ bis 5 = „sehr stark veränderlich“ eingeteilt. Besonders zu beachten sind vertikale und horizontale engräumige Wechsellagerungen von Festgesteinen, Lockergesteinen und Halbfestgesteinen, z.B. im Lettenkeuper und im Schilfsandstein. Liegen kompakte Felsschichten über sich auflösenden Halbfestgesteinen, kann der Fels seine Standfestigkeit verlieren, auseinanderfallen und abrutschen.

Festgesteine und Halbfestgesteine wie sie für Ludwigsburg charakteristisch sind..



Schilfsandstein, gebankte Flutfazies am Lemberg Ludwigsburg.



Gipskeuper, hier von Gips durchzogene Tonsteine.

[Johannes Baier, Gipskeuper Wurmlingen](#), bearbeitet, CC BY 3.0



Gipskeuper, hier Dunkelrote Mergel (Tonsteine, Dolomitsteinbänke, Kalksteinknollen) über den Grundgipsschichten.

[BerndH, Gipskeuper Äulesberg 070410](#), bearbeitet, CC BY-SA 3.0



Lettenkeuper, hier Sandstein der Esterienschichten mit Muscheln.

[BerndH, Estherien 250909](#), bearbeitet, CC BY-SA 3.0



Oberer Muschelkalk, gut gebankte, fein- bis grobkristalline und bioklastische Kalksteine, getrennt durch dünne Tonsteinfugen. [Ustill, Wutach Muschelkalk-Aufschluss](#), bearbeitet, CC BY-SA 2.0 DE



Oberer Muschelkalk, hier feinkristalliner Kalkstein mit Seelilie, Encrinus liliiformis.

[www.geologie-des-dinkelbergs.de](#), Finder: M. Lämmelin.

4.1.3 Lockergesteine

Lockergesteine variieren über eine große Bandbreite. Sie entstehen aus Festgesteinen und aus veränderlich festen Gesteinen durch Verwitterung (physikalisch/mechanische-, chemische-, biologische- und biochemische Verwitterung) und zerfallen oft mehr oder weniger schnell in Wasser. Der Zusammenhalt erfolgt durch Reibungs-, Kapillar- und Kohäsionskräfte, im Gegensatz zu den sedimentären Festgesteine, die durch mineralische Bindemittel (Kieselsäure, Karbonate, Tonminerale, Eisenverbindungen) zusammengehalten werden. Die Bodeneigenschaften von Lockergesteinen werden hauptsächlich von den beteiligten **Korngrößen**, der **Kornform**, den **Kornmischungen**, vom **Wassergehalt** und vom **Wasserhaltevermögen** bestimmt (Tabelle 7). Lockergesteine haben eine geringere Scherfestigkeit als Festgesteine und können bedingt durch ihre Entstehung auch **organische Anteile** enthalten, welche die Tragfähigkeit auch beeinträchtigen. Die Einteilung der Lockergesteine erfolgt nach DIN 1054.

4.2 Boden- und gesteinsphysikalische Eigenschaften

Gesteine und Boden wurden früher v.a. nach ihrer mechanischen Lösbarkeit in **Boden- und Felsklassen nach DIN 18300-alt** eingeteilt. Bei Gründungen auf Fels kann die DIN 1054 angewendet werden (siehe Tabellen 3, 4 und 7). Seit September 2015 gilt die **neue ATV DIN 18300 - VOB 2016**, in der die Böden angepasst an das Bauvorhaben in **Homogenbereiche** unterteilt werden (siehe Tabelle. 3). Bohrarbeiten und Arbeiten zur Bohrpfahlherstellung sollen nicht nach DIN 18300, sondern nach VOB DIN 18301 ausgeschrieben werden. Die Eigenschaften des Bodens werden in genormten mechanisch-physikalischen Labor- und Feldversuchen ermittelt und über mathematische Formeln in Zahlen ausgedrückt. Die Materie ist vielschichtig und wird hier nur kurz vorgestellt.

Es können vier Hauptgruppen von Versuchen unterschieden werden:

- Bestimmung der Bodenart (Korngröße, Kornverteilung, Konsistenzgrenzen, Plastizität, Wasseraufnahmevermögen, Kalkgehalt, organische und andere Beimengungen).
- Bestimmung der Zustandsform (Wassergehalt, Dichte, Porenanteil, Zustandsform, Konsistenz, Porenzahl, Raumgewicht, Lagerungsdichte). Die Lagerungsdichte rolliger Böden und die Konsistenz bindiger Böden wird mit der Rammsonde bestimmt (DIN EN ISO 22476-2).
- Bestimmung des Verhaltens bei mechanischer Beanspruchung (Verformungsverhalten, Zug- und Druckfestigkeit, Scherfestigkeit = max. Schubspannung eines Festkörpers gegenüber tangentialen Scherkräften).
- Bestimmung der Durchlässigkeit.

4.2.1 Korngrößen, Kornverteilung, Bodengruppen

(DIN 18123, DIN 18196, DIN 4022/DIN EN ISO 14688 und 14689, siehe Tabelle 4a)

Ein wichtiges Kriterium zur Klassifikation von Böden ist die **Korngröße**. Bei den Korngrößen ≤ 63 mm Durchmesser unterscheidet man die 4 Hauptkornfraktionen **Ton und Schluff = bindige (kohäsive) Böden (Feinkorn, Schlämmkorn)** und **Sand und Kies = nicht bindige (rollige) Böden (Grobkorn, Siebkorn)**. "Bindig" bedeutet, dass das Material dazu neigt, Wasser zu binden und es hat dann ein **echte Kohäsion c (Haftfestigkeit) = innerer Zusammenhalt** durch Haftkräfte (Scherspannung) zwischen der Teilchen (Ton- und Schluffanteil, Wasseranteil, Vorbelastung des Bodens). Die **scheinbare Kohäsion** ist der Zusammenhalt eines nichtbindigen Bodens (Sand, feiner Kies) durch kapillare Oberflächenkräfte des Porenwassers und der Verdichtung. Bei Wassersättigung und Bodenaustrocknung verschwindet die Scheinkohäsion. Sie ist i.d.R. gering und darf als bodenmechanischen Rechengrößen nicht berücksichtigt werden.

Ton (T), (Tab. 1a) ist ein oft an Erdoberfläche bis mehrere Meter darunter verbreitetes bio-geochemisches Mineralgemisch und ist im baugrundtechnischen Sinne die feinste Kornfraktion der klastischen Sedimente mit einer Korngröße von $< 0,002$ mm. Tone entstehen permanent durch die mechanisch-chemische Verwitterung (klastische Sedimente, s. Abb. 13) des Muttergesteinss zusammen mit biochemischen Prozessen von Mikroorganismen, Flechten und Pflanzenwurzeln. Dabei entstehen aus den aluminiumhaltigen Primärmineralen der Locker- und Festgesteine, wie z.B. Glimmer und andere Alumosilikate die mikroskopisch winzigen ($< 2 \mu\text{m}$) blättchen- und stabförmigen sekundären Tonminerale, wie z.B. Kaolinit, Halloysit, Illit, Montmorillonit und Chlorit (Schichtsilikate). Diese Mineralneubildung geht einher mit einer Umlagerung und Verdichtung der Mineralkörper. Bei der Diagenese verfestigt sich weicher Ton mit der Zeit zu hartem **Tonstein**. Bei Wasserzutritt weicht dieser wieder auf. Die große innere spezifische Oberfläche infolge der kleinen Mineralplättchen erklärt das sehr aktive bodenphysikalische und biochemische Verhalten und gibt Tonen eine hohe Wasseraufnahme- und Wasserhaltefähigkeit. Die Haftung der Teilchen untereinander erfolgt durch Kohäsion, d.h. durch den Zusammenhalt der an die Tonminerale gebundenen Wasserteilchen durch elektrische Kräfte - Van der Waal'sche Kräfte (Ränder der Plättchen positiv, Flächen negativ). Tone mit einem ausreichenden Wassergehalt sind plastisch verformbar, trockene Tone brechen spröde. Charakteristisch ist das Quellen und Schrumpfen des Bodens bei Wassergehaltsänderungen. In feuchten Tonböden treten bei Belastung oft langandauernde und hohe Setzungen auf und die eher geringe Tragfähigkeit ist von der Konsistenz, also vom Wassergehalt abhängig. Tone sind frost- und schrumpfempfindlich, sind schwer verdichtbar und sind oft ein ungünstiger Baugrund. Nur trockene und harte Tonböden mit über 3 m Mächtigkeit können ein durchschnittlicher Baugrund sein. **Tonböden** lassen sich gut an der glänzenden Oberfläche beim Reiben der Bodenprobe zwischen den Fingern erkennen und fühlen sich seifig-klebrig an. **Schluffböden** bleiben hier matt, fühlen sich weich und mehlig an und knirschen zwischen den Zähnen. **Sandanteile** im Boden spürt man mit den Fingern, **Feinsand** knirscht zwischen den Zähnen. **Reine Tonböden** in größerer Mächtigkeit kommen selten vor. Ton tritt häufig in gemischtkörnigen Böden zusammen mit Schluff und Sand (Lösselehm, Lehm) und in Böden mit einem starken organischen Anteil auf. Bei $\geq 15\%$ Tonanteil bestimmt dieser die bodenmechanischen Eigenschaften.

Schluff (Silt, U), (Tab. 1a) besteht oft aus feinstem Quarz, Feldspat und anderen Mineralen. Er hat eine Korngröße von 0,002 bis 0,063 mm und ist als Mischung mit Ton und Sand (U, t, s - Lehm) ein häufig vorkommender und wasserhaltender Boden. Schluff hat v.a. in der Fein- und Mittelfaktion ähnliche Eigenschaften wie Ton und ist je nach Wassergehalt und Konsistenz bei steifer bis halbfester Konsistenz ein durchschnittlicher aber anhaltend setzungsempfindlicher Baugrund. Ist der Schluff aber weich und humos ist er als Baugrund kaum geeignet. Schluff ist auch für größere Lasten oft wenig geeignet und ist frost- und schrumpfempfindlich. Im Gegensatz zum Ton besitzt Schluff eine geringere Plastizität. So können schon geringe Wassergehaltsänderungen die Konsistenz deutlich verschieben, was dann zu einer raschen Veränderung der Baugrundeigenschaften, insbesondere der Tragfähigkeit, führen kann. Zudem lassen sich Schluffböden schwer entwässern. Ton- und Schluffkörner sind mit bloßem Auge nicht erkennbar. Ein im Strohgäu verbreiteter Schluffboden (~ 80 % Schluffanteil) ist unverwitterter Löss, der wegen seines verkittenden Kalkgehaltes für kleinere Lasten oft ein durchschnittlicher Baugrund ist (Abb. 12a).

Sand (S), (Tab. 1a) hat eine Korngröße zwischen 0,063 bis 2 mm, besitzt keine bindigen Eigenschaften und hat keine Konsistenz. Das Hauptmineral ist oft Quarz als resisterter Rückstand der Verwitterung mit Anteilen anderer Minerale, z.B. Feldspäte (ab 25% Arkose) oder Tonmatrix (Grauwacke). Es gibt aber auch Sande aus Karbonatgesteinen, z.B. Korallensande, aus vulkanischen Gesteinen, aus Granat, aus Gips und aus anderen Mineralen. Sande sind gut verdichtbar und gut entwässerbar.

Grobsand ist bei ausreichender Lagerungsdichte ein durchschnittlicher bis günstiger Baugrund. **Feinsand** ist weniger geeignet. Feuchter Sand besitzt oft die sog. "Scheinkohäsion", welche bei Zuordnung der bodenmechanischen Kenngrößen nicht berücksichtigt werden darf. Zu beachten ist ggf. ein schluffig-toniger Feinanteil, der in Sanden die bodenmechanischen Eigenschaften deutlich beeinflussen kann. Sande mit eckigen Kornformen (Flusssand, Strandsand) sind als Bausand gut geeignet und haben bessere bodenmechanische Eigenschaften als Sande mit runden Kornformen (unter Windeinfluss gerundeter Wüstensand). Wegen der starken Bautätigkeit kommt es regional zu einer Verknappung von geeigneten Sanden für die Herstellung von Beton und anderen Baustoffen. In Deutschland und in Europa gibt es aber genügend geeigneten Sand und Kies. Lockere Sandböden und aufgefüllte Sande lassen sich in ihrer Tragfähigkeit gut mit Kunstharzinjektionen verbessern.

Kies (G), (Tab. 1a) hat eine Korngröße zwischen 2 bis 63 mm und ist ein wenig kompressibler und günstiger Baugrund. Kies besteht oft aus Sandsteinen, Karbonatsteinen, Kristallingesteinen, Quarzgestein und aus Radiolariten (biogen-marines Gestein aus mikrokristallinem Quarz). Lockere Kiesablagerungen kommen v.a. in den würmkaltzeitlichen und holozänen Erosionsterrassen und Talauen vor, haben oft unterschiedliche Sandanteile und es können Schlicklinsen eingelagert sein, die bei Bauvorhaben auszuheben sind.

Als **Steine und Blöcke (X, Y)** werden Korngrößen mit mehr als 63 mm Durchmesser bezeichnet (DIN EN ISO 14688-1 + 2).

Ton und Schluff werden auch als **Feinkorn oder Schlämmkorn** bezeichnet. Sand und Kies werden als **Grobkorn oder Siebkorn** bezeichnet. Kies, Sand und Schluff können in die Grob-, Mittel- und Feinfractionen (g, m, f) unterschieden werden. Beimengungen werden mit Kleinbuchstaben gekennzeichnet (t = tonig, u = schluffig, g = kiesig, h = torfig, humos; z.B. mG = Mittelkies, Ufs = Schluff, feinsandig). Starke oder schwache Anteile werden mit ~ bzw. * oder ` gekennzeichnet, z.B. fGs ~ bzw. Ufs*. Organische Beimengungen (O, o), sind Torf (H, h), Faulschlamm, Mudde (F). Eine Übersicht der **Bodengruppen** etc. gibt es in Tab. 7 und 8e.

Weitere Unterteilungen erfolgen nach der Korngrößenverteilung (Abb. 12a):

- E = enggestufte Korngrößenverteilung (GE, SE)
- W = weitgestufte Korngrößenverteilung (GW, SW)
- I = intermittierend gestufte Korngrößenverteilung (GI, SI)

und bei bindigen Böden nach den plastischen Eigenschaften:

- L = leicht plastisch (UL, TL), $W_L \leq 0,35$
- M = mittelplastisch (UM, TM), $0,35 < W_L \leq 0,5$
- A = ausgeprägt plastisch bzw. zusammendrückbar (UA, TA), $W_L > 0,5$

Blöcke	> 200 mm	
Gerölle	200 - 63	
Kies		Siebkorn
grob	63 - 20	
mittel	20 - 6,3	
fein	6,3 - 2	
Sand		
grob	2 - 0,63	
mittel	0,63 - 0,2	
fein	0,2 - 0,063	
Schluff		Schlämmkorn
grob	0,063 - 0,02	
mittel	0,02 - 0,0063	
fein	0,0063 - 0,002	
Ton		
grob	0,002 - 0,00063	
mittel	0,00063 - 0,0002	
fein	< 0,0002 mm	

Kornfraktionen

Gemischtkörnige Böden:

Viele oberflächennahe Böden sind Mischformen der o.g. Korngrößen, wie z.B. Sand, schluffig (Su) oder Sand, stark tonig (St*) und werden Gemischtkörnige Böden genannt. (Abb.12). Gesteine aus Ton und Schluff werden auch Schlammsteine genannt. Die Kornverteilung einer Bodenprobe wird als Körnungslinie dargestellt (Abb. 12a). Aus der Körnungslinie kann mit den prozentualen Anteilen der Korngruppen die Kornkennziffer angegeben werden. Die Steigung der Körnungslinie gibt die Gleichförmigkeit (steile Linie) oder Ungleichförmigkeit (flache Linie) eines Bodens an und kann zur Berechnung der Ungleichförmigkeitszahl ($C_u = d60/d10$) herangezogen werden. Der Lösslehmb in Abb. 12a hat die Kornkennziffer 1810 (10% Ton, 80% Schluff, 10% Sand, 0% Kies) und die Ungleichförmigkeitszahl $C_u = 10$ (DIN 18196 und 14688-2: $C_u < 6$ = eng gestuft; $C_u = 6 - 15$ = mittel gestuft; $C_u > 15$ = weit gestuft). Böden mit nur einer Korngröße, z.B. reiner Schluff, kommen in der Natur nicht sehr häufig vor.

Nach DIN 18196 und DIN 4022 werden Sande und Kiese bis zu einer Beimengung des Feinkorns von Schluff und Ton < 5 Gew.-% bodenmechanisch noch als reine Sande und Kiese bezeichnet. Ab > 15 Gew.-% Feinkornanteil (Schluff und Ton) verlieren Sande und Kiese ihren Korn- auf Korn-Kontakt und haben dann die bodenmechanischen Eigenschaften der bindigen Böden und es ist eine Konsistenz vorhanden. Das Feinkorn bestimmt dann das Verhalten eines gemischtkörnigen Bodens, wenn der Boden im Trockenfestigkeitsversuch (nach DIN 4022, Abschnitt 8.5) mindestens eine mittlere Trockenfestigkeit aufweist und/oder im Knetversuch (nach DIN 4022, Abschnitt 8.7) knetbar ist. Hier sind die plastischen Eigenschaften bestimmend und der Boden wird entsprechend seiner Plastizität als Ton oder Schluff benannt (DIN 4022 T1/DIN EN ISO 14688 und 14698, und Tabelle 1a: Bodenarten und ihre Eigenschaften). Gemischtkörnige Böden sind an der Oberfläche weit verbreitet, so z.B. als Verwitterungsbildungen, Hangschutt, Geschiebemergel und Geschiebelehm. Die zugehörigen Bodengruppen sind: Kies-Schluff, Kies-Ton, Sand-Schluff, Sand-Ton (GU, GT, SU, ST, mit * = stark, mit ` = schwach)

Man unterscheidet:

- Grobkörnige Böden - Kies (G) und Sand (S)** - haben $\leq 5\%$ Feinteile $\leq 0,063\text{ mm}$. Die Klassifikation erfolgt nach der Korngrößenverteilung. Die zugehörigen Bodengruppen sind: GW, GE, GI, SW, SE und SI. E = enggestuft, I = intermittierend, W = weitgestuft.
- Feinkörnige Böden - Schluff (U) und Ton (T)** - haben $\geq 40\%$ Feinteile $\leq 0,063\text{ mm}$. Die Klassifikation erfolgt nach den plastischen Eigenschaften. Die zugehörigen Bodengruppen im Plastizitätsdiagramm sind: UL, UM, UA, TL, TM und TA (L = leichtplastisch, M = mittelpflastisch, A = ausgeprägt plastisch). GW, GE, UL, UM etc. sind Kurzzeichen der Bodengruppen nach DIN 4022, DIN 18196/DIN EN ISO 14688-1. (Siehe Kapitel 4.2.1 und Tab. 7).
- Gemischtkörnige Böden - Kies-, Sand-, Schluff-, Tongemische** - Böden der Korngröße haben $5 - 40\%$ Feinanteile $\leq 0,063\text{ mm}$. Hier variiert die Kornzusammensetzung oft in großer Breite mit sehr unterschiedlichen plastischen Eigenschaften. Je nach dem Anteil der einzelnen Kornfraktionen ist das bautechnische Verhalten solcher Böden vorwiegend rollig oder bindig (Abb. 12).
- Bei geschütteten Böden** wird zwischen unverdichteten Schüttungen in beliebiger Zusammensetzung und verdichteten Schüttungen aus Lockergesteinen oder aus anorganischen Schüttgütern (Bauschutt, Schlacke) unterschieden. Die Baugrundeigenschaften sind sehr unterschiedlich und oft befinden sich auch Schadstoffe (Teer, Schwermetalle etc.) in diesen Böden.

Bodenklassifikation nach DIN 18196

Grobkörnige Böden		
Massenanteil d $\leq 0,06\text{ mm}$ kleiner 5%		
Massenanteil d $\leq 2\text{ mm}$ bis 60%	Kies	GE, GW, GI
Massenanteil d $\leq 2\text{ mm}$ über 60%	Sand	SE, SW, SI
Gemischtkörnige Böden		
Massenanteil d $\leq 0,06\text{ mm}$ 5% bis 40%		
Massenanteil d $\leq 2\text{ mm}$ bis 60%	Kies-Schluff-Gemische Kies-Ton-Gemische	GU, GU [*]) GT, GT [*])
Massenanteil d $\leq 2\text{ mm}$ über 60%	Sand-Schluff-Gemische Sand-Ton-Gemische	SU, SU [*]) ST, ST [*])
^{*) U, T; d $\leq 0,06\text{ mm}$ größer 15%, U = U*, T = T*}		
Feinkörnige Böden		
Massenanteil d $\leq 0,06\text{ mm}$ über 40%		
I _p $\leq 4\%$	Schluff	UL, UM, UA [*])
I _p $\geq 7\%$	Ton	TL, TM, TA [*])
^{*) UL, TL: w_L < 35%, UM, TM: w_L $\leq 50\%$, UA, TA: w_L > 50%}		

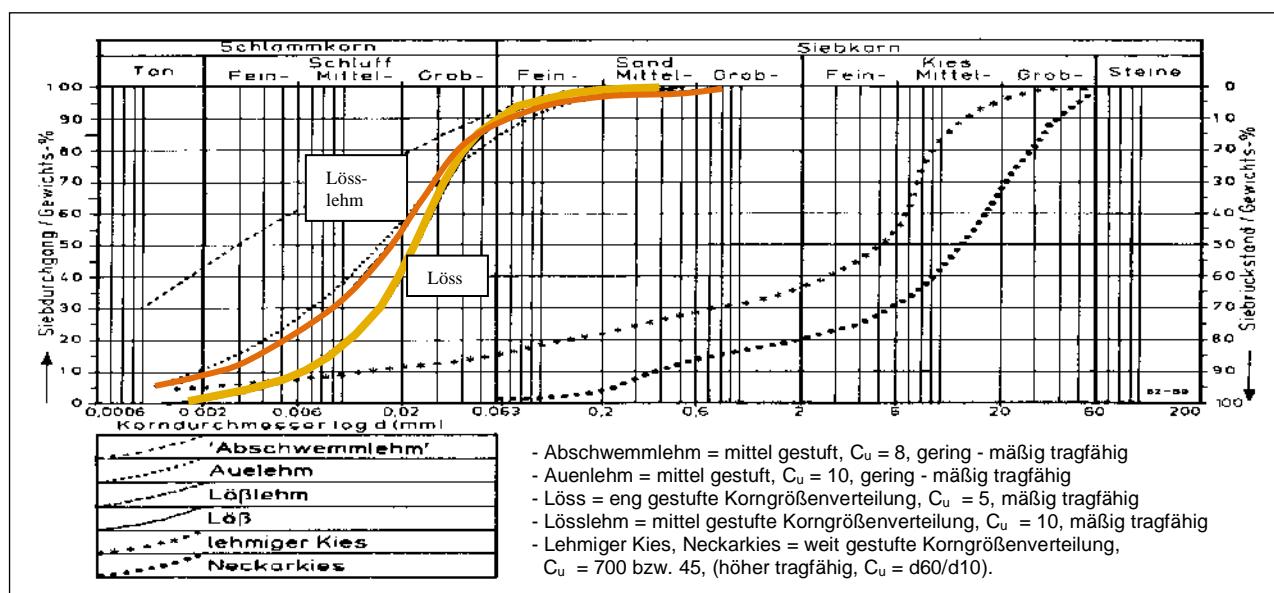
Abb.12: Bodenklassifikation nach DIN 18196.

Grafik aus: Bodenmechanisches Praktikum, HS Bielefeld - Labor für Bodenmechanik, Prof. Dr.-Ing. Antje Müller-Kirchenbauer, Dipl. Ing. (FH) Holger Paetsch. Abkürzungen der Bodengruppen siehe Tabelle 7, 8e. Querstrich = stark

Abb.12a:

Kornverteilungskurven (Kornsummenlinien, Sieblinie), Klassifikation nach DIN 4022.

Das halblogarithmische Diagramm zeigt einige typische Kornverteilungskurven von Lockergesteinen im Raum Ludwigsburg. Besonders hingewiesen wird auf den unterschiedlichen Tonanteil in Lösslehm und Löss.



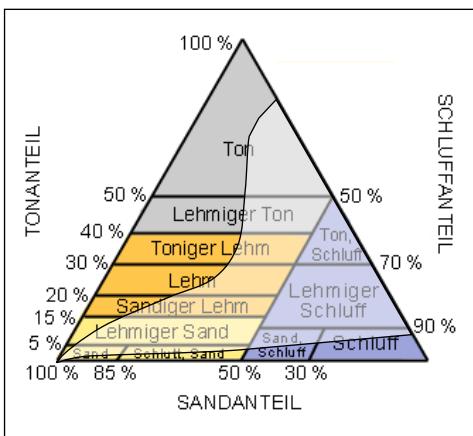


Abb.13: Die Hauptbestandteile von Feinkorn und Sand (Lehmfamilie) lassen sich in einem Dreiecksdiagramm darstellen.

Besteht ein Boden beispielsweise zu etwa gleichen Teilen aus Sand, Schluff und Ton, spricht man von Lehm. Nimmt der Tonanteil zu, entsteht zunächst toniger Lehm und bei weiterer Zunahme lehmiger Ton. In den Ecken des Dreiecks ist immer 100 % Ton, Sand und Schluff. Reine Tone, Schliffe und Ton-Sande kommen nicht häufig vor.
Hellgrau = häufig vorkommende Mischungen

Klastische Sedimente -gr. *klasis* = zerbrechen- sind Ablagerungen, die durch physikalisch-chemisch-biogene Verwitterung aus Festgestein, Abtragung und Transport durch Schwerkraft, Wasser, Wind und Eis und anschließender Ablagerung und ggf. Verfestigung entstanden sind (Schuttmassen, Moränen, Schotter, Kiese, Sande, Schluffe, Tone, Breccien, Konglomerate, Sandsteine, Schluffsteine, Tonsteine, klastische Karbonatgesteine).

4.2.1.1 Einteilung der Lockergesteine nach DIN 1054

Nichtbindige (rollige) Böden mit ≤ 15 Gew.-% Ton und Schluff ($\leq 0,063$ mm) sind trocken kohäsionslos und bestehen aus Sand und Kies bzw. aus deren Mischungen. In feuchtem Zustand können sie eine **Scheinkohäsion** haben, die nicht in Baugrundberechnungen einfließen darf. Die Körner stützen sich gegenseitig ab und es besteht ein Korn-auf-Korn-Stützgerüst. An den Berührungsflächen wirken lediglich Reibungskräfte. Diese Böden können Wasser nicht halten, lassen sich gut entwässern, weichen nicht auf und ihre Tragfähigkeit ist von der Lagerungsdichte und von der Kornform abhängig. Setzungen unter statischen Belastungen sind eher gering und erfolgen schnell. Nichtbindige Böden sind v.a. bei eckigen Kornformen, dichter Lagerung und ausreichender Schichtdicke ein günstiger Baugrund (Flusssand). Sande mit runden Kornformen (feiner Wüstensand) sind bautechnisch ungünstiger und als Bausand kaum geeignet. Bei **Erschütterungen, z.B. durch Erdbeben**, können wasser gesättigte, relativ gleichkörnige und locker gelagerte Feinsand- und Schluffböden, z.B. junge Schwemmböden an Küsten bei flachem Grundwasserstand, zu **Schwimmsand** werden. Die sehr schnellen und rhythmischen Erschütterungen (Scherbelastung) dieses lockeren Bodens führt zu dessen Verdichtung. Das Porenwasser zwischen den Bodenkörnern kann aber nicht schnell genug abfließen, der **Porenwasserdruck** zwischen den Körnern erhöht sich, diese werden auseinandergerückt und verlieren ihren punktförmigen Korn-auf-Korn-Kontakt. Die Haftreibung und die Scherfestigkeit nehmen stark ab und der Boden verflüssigt sich zu einer breiigen Masse. Bei dieser **Bodenverflüssigung** können Gebäude kippen, oder ganze Siedlungen können ins Rutschen kommen. Setzt sich der Boden durch die Rüttelbewegungen, kann das ausgepresste Wasser an der Oberfläche austreten.

Bindige (plastische, kohäsive) Böden bestehen aus feuchtem Ton oder Schluff und oft aus einer Mischung beider (Tonminerale, Quarz, Feldspat, Glimmer) mit einem sehr unterschiedlichen Anteil größerer Kornfraktionen. Ein Anteil von 5 % bis 10 % Ton und Feinschluff geben auch einem nichtbindigen Boden schon leicht bindige Eigenschaften (gemischtkörniger Boden). Böden mit einem Anteil der Korngröße $\leq 0,063$ mm von > 15 Gew.-% werden als bindige Böden bezeichnet, weil hier der Schluff- und Tonanteil die bodenmechanischen Eigenschaften bestimmt. Es besteht dann kein Korn-auf-Korn-Stützgerüst mehr. Der bindige Anteil besteht aus mikroskopisch kleinen Plättchen und hat abhängig von der Konsistenz bzw. vom Wassergehalt eine reversible Festigkeit und plastische Eigenschaften. Bindige Böden werden hauptsächlich durch Kohäsionskräfte (Haftungskräfte, Schub- und Scherspannung, in Tonen bis zu 80 kN/m^2) zusammengehalten, nehmen Wasser langsam auf und können es gut halten. Stark bindige Böden haben einen hohen Tonanteil und nehmen Porenwasser schwer auf und geben es langsam ab. Sie sind nur sehr gering wasserdurchlässig. Eine Änderung der Zustandsform erfolgt erst nach einer größeren Wassergehaltsänderung. Schwach bindigen Böden (Schluff) mit einem kleineren Tonanteil ändern ihre Zustandsform schon bei einer geringen Wassergehaltsänderung, sind wasserempfindlich und rutschgefährdet. Sie müssen bei der Gewinnung, Lagerung und Einbau vor Wasserzutritt geschützt werden. Das **Tragverhalten bindiger Böden** ist vom Wassergehalt abhängig und wird bestimmt durch die Plastizität, die geringe Durchlässigkeit, die Schrumpf- und Quelleigenschaften, durch das Konsolidierungsverhalten und durch das Rückhaltepotsial. Bindige Böden verformen sich unter Belastung und sind empfindlich gegen dynamische Beanspruchungen, z.B. durch Maschinenfundamente. Die Setzungen unter Belastung sind oft hoch und erfolgen langsam bis langanhaltend. Bindige Böden sind teils ein durchschnittlicher und teils ein ungünstiger Baugrund.

Organogene Bestandteile (V_{gl}) (O = organogen, H = Torf, F = Faulschlamm, Mudde) findet man in vielen Lockergesteinen und in manchen Festgestein. Der wechselnde Anteil an organischer Substanz ist durch die Lebensvorgänge im oberflächennahen Boden entstanden. Bei organischen Beimengungen ab ≥ 3 Gew.-% in nichtbindigen Böden und ab ≥ 5 % in bindigen Böden werden diese als "**organische Böden**" bezeichnet (DIN 1054), die für Bauzwecke nur eingeschränkt oder nicht geeignet sind. Organische Beimengungen erhöhen die Zusammendrückbarkeit und vermindern die Scherfestigkeit. Schluff- und Tonböden mit bis 20 % organische Substanz werden als Klei oder Schlick bezeichnet. Ab Beimengungen ab 20 % handelt es sich um "**hochorganische Böden**", die für Gründungszwecke nicht geeignet sind. Torfe und Mudden sind für Gründungen ebenfalls ungeeignet.

Abb. 14: Lockergesteine (Böden)

Ton, in reiner Form relativ selten.
Siim Sepp, Clay-ss-2005, bearbeitet, CC BY-SA 3.0



Brocken aus verbackenem Schluff
Bild: URETEK Deutschland.



Sand. Bild: URETEK Deutschland.



Kies und Schotter plattig, kantengerundet und gerundet.
Bild: Bayerisches Landesamt für Umwelt.



Straßenschotter, Auffüllung, maschinell kantig gebrochen.
Emadrazo, Gravel 03375C, bearbeitet, CC BY-SA 4.0



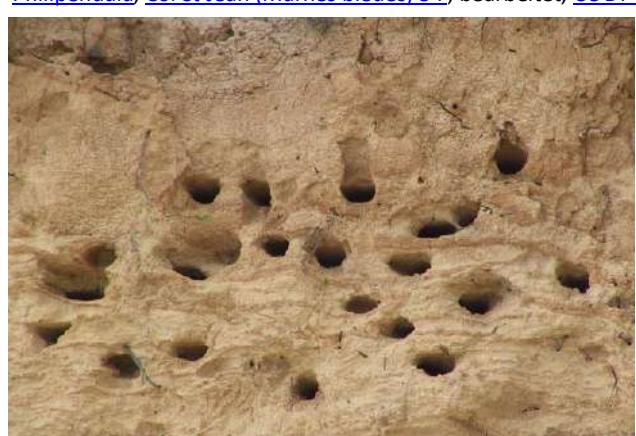
Mittel- bis Feinkies und Sand. Graupensand der miozänen nordalpinen Molasse. BPA Riedl, gemeinfrei.



Mergel (Tonmineral-Schluff-Kalk-Mischung), angewittert.
Philipendula, Col St Jean (Marnes bleues) 3 F, bearbeitet, CC BY-SA 3.0



Löss, unverwitterter Schluff, dauerhaft senkrecht stehende Wand.
Fritz Geller-Grimm, Loess fg1, bearbeitet, CC BY-SA 2.5



Lehm (Sand-Schluff-Ton-Mischung, z.B. Lösslehm), hier mit Brutröhren von Uferschwalben.
Hartmut Inerle, Brutroehre Riparia riparia, bearbeitet, CC BY-SA 3.0

4.2.2 Kalkgehalt (DIN 18129)

Ein **Kalkgehalt (V_{Ca})** (Kalzium- und Magnesiumkarbonat) > 5 % hat einen günstigen Einfluss auf das bautechnische Verhalten eines Bodens. Der natürliche Kalkgehalt des oberflächennahen Bodens wird durch kohlendioxidhaltige Niederschläge (Kohlen-säure, H₂CO₃) mit der Zeit gelöst und ausgewaschen, so dass die während und nach der letzten Kaltzeit entstandenen Böden in unseren Breiten mindestens 1 - 2 m tief entkalkt sind (z. B. kalkreicher Löss → kalkarmer Lösslehm). Böden aus älteren Kaltzeiten sind oft mehrere Meter bis über 10 m tief entkalkt. Mit der Entkalkung und mit der Verwitterung der Primärsilikate im Boden zu Tonmineralen (Verlehmung) verschlechtern sich die Baugrundeigenschaften eines Bodens. Der Kalk wird bei der Lössverwitterung in tieferen Bodenbereichen oft als Kalkkongretionen wieder ausgeschieden (Lösskindl, Ortstein). In der Bautechnik werden kalkarme Böden durch Kalkung in ihrer Stabilität und Tragfähigkeit verbessert. Kalk bindet Wasser und verbessert so die Konsistenz des Bodens. Der Kalkgehalt wird im Labor oder im Feldversuch mit einer 10-prozentigen Salzsäure bestimmt. Kein Aufbrausen < 1 %, schwaches, nicht anhaltendes Aufbrausen 1 – 5 %, starkes, anhaltendes Aufbrausen > 5 % Kalkgehalt.

Je nach Korngrößenmischung und Kalkgehalt gibt es noch folgende Unterscheidungen:

- **Lehm** ist eine weitgehend entkalkte und verwitterte Mischung aus Ton, Schluff und Sand.
- **Mergel** ist ein Gemenge aus Ton, Schluff und Kalk. Es wird reiner Kalk, (90 – 100 % Karbonat), mergeliger Kalk, Mergelkalk, Kalkmergel, Mergel, Tonmergel, Mergelson, mergeliger Ton und Ton (< 2 % Karbonat) unterschieden.
- Als **Letten** werden regional in Süddeutschland feste Tone mit geringerem Kalkgehalt bezeichnet.
- **Löss** ist ein kalkhaltiger und poröser Schluff mit unterschiedlichen Feinsand- und Tonanteilen, der während der Kaltzeiten durch Wind (äolisches Staubsediment) transportiert und bei nachlassender Windgeschwindigkeit abgelagert wurde.
- **Lösslehm** entsteht durch Verwitterung von Löss. Einsickerndes Niederschlagswasser und Mineralneubildung (Primärsilikate -> Tonminerale) führt zur Entkalkung und Verlehmung. Lösslehm ist dichter gelagert und hat einen höheren Wassergehalt als Löss. Löss und Lösslehm sind wasser- und frostempfindlich. Auf Lösslehm entwickeln sich wegen des guten Wasserbindevermögens in Verbindung mit der hohen Kapillarität des unterlagernden Lösses und wegen der guten Bearbeitbarkeit fruchtbare Böden, die auf den Gäuflächen weit verbreitet sind (Parabraunerde, Paraschwarzerde).

Lehme können bei Wasseraufnahme quellen und beim Trocknen mit Rissbildung schrumpfen. Trockene, tonige Böden sind fest und getrockneter Ton und Lehm ist als Baustoffe geeignet, z.B. als getrocknete oder gebrannte Lehmziegel.

4.2.3 Wassergehalt (DIN 18121)

Der **Wassergehalt (w)** eines Bodens ist die Masse des verdampften Wassers bezogen auf die Trockenmasse der Probe $w = \text{Wasseranteil} : \text{Trockenmasse}$. Die **Konsistenz, die Verdichtbarkeit und die Tragfähigkeit** der bindigen Böden werden im Gegensatz zu den rolligen Böden stark von ihrem Wassergehalt beeinflusst. Dieser Zusammenhang ist umso bedeutender, je bindiger ein Boden ist. Der Wassergehalt wird im Labor durch Trocknung der Bodenprobe bei 105°C (bei organischen Böden 60 - 65°C) ermittelt. Die Masse des verdampften Wassers ist der mobile Wassergehalt (Porenwasser). Das immobile Wasser (Wasser in den Schichtgittern der Tonminerale = Hydratationswasser; gebundene Wasserhülle an den Mineralkörnern = Adsorptionswasser; Porenwinkelwasser = Kapillarwasser) wird hier nicht erfasst und ist bodenmechanisch nicht wirksam. Bei geringem Wassergehalt sind zur Verdichtung des Bodens hohe Kräfte erforderlich, weil die Bodenpartikel gut miteinander verzahnt sind. Bei optimalem Wassergehalt wird die Reibung zwischen den Körnern herabgesetzt, so dass eine Umlagerung und Verdichtung mit geringeren Kräften möglich sind, aber durch die Kornkontakte die gute Scherfestigkeit des Bodens erhalten bleibt. Bei weiterer Wasserzugabe werden die Kontakte und die Verzahnung zwischen den Bodenteilchen weiter gelockert und die Scherfestigkeit nimmt weiter ab, bis der Boden breiig bis zähflüssig wird (Abb. 14).

Natürlicher Wassergehalt (w_n) erdfeuchter Böden:

• Sand	< 0,1	< 10 %	Der Wassergehalt von Festgestein (Porenwasser) liegt bei Tonsteinen um 5 %, bei Sand- und Kalksteinen nur um 1 %.
• Löss	0,1 - 0,25	10 - 25 %	
• Lehm	0,15 - 0,40	15 - 40 %	
• Ton	0,2 - 0,8	20 - 80 %	
• organischen Böden	0,5 - 8	50 - 800 %	

Weitere wichtige Kennzahlen in diesem Zusammenhang sind:

- Die **Sättigungszahl** ($Sr = \text{Porenwasseranteil} : \text{Gesamtporenanteil}$) gibt an, in welchem Ausmaß die Poren eines Bodens mit Wasser gefüllt sind.
- Das **Wasseraufnahmevermögen** (DIN 18132) ($w_b = \text{Aufgenommene Wassermenge} : \text{Trockenmasse}$) ist die kapillare Ansaugung von Wasser, abhängig von der spezifischen Oberfläche des Feinkorns und der Aktivität der Tonminerale.
- Das **Wasserbindevermögen** ist die Menge Wasser, die ein getrockneter Boden nach vier Minuten aufgenommen hat, bezogen auf die zuvor ermittelte Trockenmasse.

4.2.4 Dichte, Wichte, Auflockerung (DIN 18124, 18125, 18126, DIN ISO TS 17892-2)

Man unterscheidet:

- Feuchtdichte ($\rho = \text{Rho}$, g/cm^3 , t/m^3):** Raumgewicht inkl. Eigenporen aber ohne Haufwerksporen. Es ist die Dichte eines feuchten Bodens einschließlich der mit Gas und Flüssigkeit gefüllten Eigenporen. $\rho = \frac{\text{totale (Feucht)masse (m)}}{\text{totales Volumen (V)}}$. Hier gibt es noch die **Dichte unter Auftrieb ρ'** .
- Dichte des wassergesättigten Bodens (ρ_s):** Formel wie oben.
- Trockendichte (ρ_d):** $\rho_d = \frac{\text{Masse des trockenen Bodens (Festsubstanz)}}{\text{totales Volumen (Vt)}}$.
- Korndichte (ρ_s) von Lockergesteinen:** $\rho_s = \frac{\text{Kornvolumen (V}_k\text{)}}{\text{Trockenmasse der Festsubstanz (m}_T\text{)}}$, Trocknung bei 105 °C.
- Reindichte (ρ_{rein}) bzw. Feststoffdichte (ρ_F) von Festgesteinen:** Dichte des rein stofflichen Anteils bzw. wahre Dichte ohne Haufwerks- und Eigenporen. $\text{Reindichte} (\rho_{rein}) = \frac{\text{Rohdichte} (\rho_b)}{\text{Porosität (Porenvolumen) (\Phi)}}$.
- Rohdichte (ρ_b):** Dichte eines porösen Festkörpers ohne Haufwerksporen, scheinbare Dichte bzw. Raumgewicht. Reindichte und Rohdichte unporöser Körper sind gleich. $\text{Rohdichte} (\rho_b) = \text{Reindichte} (\rho_{rein}) = \text{Porosität (\Phi)}$.
- Schüttichte (ρ_{sch}):** $\rho_{sch} = \frac{\text{Masse eines Stoffs (m)}}{\text{geschüttetes Volumen (V}_{sch}\text{)}}$ einschließlich Haufwerks- und Eigenporen. Daraus lassen sich die **Porenzahl (Porenziffer) = Porenvolumen : Feststoffvolumen** bestimmen. Die Porenzahl ist von erheblichem Einfluss auf die bei der Belastung eines Bodens zu erwartenden Setzungen.

Die **Wichte, spezifisches Gewicht (γ)**: ($\gamma' = \text{Wichte unter Auftrieb, kN/m}^3$) ist die volumenbezogene, lotrecht wirkende Gewichtskraft, die ein Körper mit einer bestimmten Dichte (ρ) aufgrund der Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) ausübt $\gamma = \rho \times g$. Die Wichte wird zur Berechnung von Erdauflasten, Erddruck, Grundbruch, Setzungen und Massenverlagerungen benötigt (Werte siehe Tab. 2).

- Trockenraumgewicht (γ_d):** $\gamma_d = \frac{\text{Gewicht Festsubstanz (G}_B\text{)}}{\text{totales Volumen (V}_t\text{)}}$.
- Feuchtraumgewicht (γ):** $\gamma = \frac{\text{totales Gewicht (G)}}{\text{totales Volumen (V}_t\text{)}}$.

Der **Auflockerungsfaktor (DIN ISO 9245)** ($f_s = V_{\text{locker}} : V_{\text{gewachsen}}$) beim Aushub von Böden streut breit.

Anhaltswerte sind: Mutterboden 1,1 - 1,35, Erdaushub 1,4, Sand und Lehm 1,15 - 1,25, Kies und Ton 1,25 - 1,30, Fels und Steinmaterial 1,25 - 1,60, Betonabbruch 1,4, Belagsmaterial 1,5.

Abb.14-a: Raumgewichte poröser Festkörper und Schütttdichten von Baumaterialien.

Quelle: Dürst AG, Kirchberg, CH.

Raumgewicht von Baustoffen mit Poren				Raumgewicht von Natursteinen		Schema Rein-, Roh- und Schütttdichte	
	Tonnen/m ³		Tonnen/m ³	Stoff	$\rho / (10^3 \text{ kg/m}^3)$		
Asbest	2,1–2,8	Kohle, Brikett-	1,25			Hauferwerbsporen	
Asphalt, Stampf-	2	Koks, in Stückchen	0,6			Eigenporen	
Asphalt, Guß-	1,4–1,8	Koks, geschüttet	0,35–0,45				
Bauschutt	ca. 1,4	Kork	0,24				
Beton aus		Korkstein	0,6				
Bimssteinkeins	0,8–1	Lehm, naß	1,65–2,85				
Granitschotter		Lehm, trocken	1,6				
Kies	2,2–2,5	Linoleum	1,2				
Kohlenschlacke	2,2	Marmor (Carrara)	2,72				
Ziegelschotter	1,0	Mauerwerk aus Kunststein:					
Bimsstein	1,8	Bimsstein	0,78–0,86				
geschüttet	0,4–0,9	BKS-Stein	1,2				
Bruchsteinmauerwerk aus:		Kalksandstein,					
Granit	2,7	Vollmauer	1,6–1,9				
Kalkstein	2,5	Kalksandstein,	1,1–1,5				
Sandstein	2,4	Hohlnmauer	1,1–1,5				
Schleifer	2,5	Klinker in Zement	1,9				
Dolomit	2,9	Korkstein	0,6				
Eisenbeton	2,5	Kunststein	2,1				
Erde, trocken, geschüttet	1,4–1,8	Schwemmstein	0,85				
Erde, naß, geschüttet	1,7–2,5	Schlackenstein	0,18–1,28				
Eternit	1,8–1,9	Mauerwerk aus:					
Fußbodenbeläge aus:		Backsteinen:					
Gips	2,1	Lochstein, normal	1,5				
Gußasphalt	1,4–1,8	Vollstein, normal	1,7				
Korkplatten	0,3	Isolierstein	1,3				
Linoleum	1,2	Mörtel aus Kalk, trocken	1,7				
Terrazzo	2,0	Mörtel aus Gips	1,0				
Tonfliesen	2,0	Mörtel aus Zement	2,0				
Gips, gegossen, trocken	0,97	Papier	0,7–1,15				
Gips, gebrannt	1,8	Pech	1,07–1,1				
Gipsdielenwand	0,9	Porzellan	2,4–2,5				
Glas, Fenster	2,4–2,65	Quarz	2,5				
Gneis	2,4–2,7	Sand, trocken, geschüttet	1,4–1,8				
Granit	2,5–3,05	Sand, naß, geschüttet	1,7–2,5				
Gummifabrikate	1–2	Sandstein	2,2–2,5				
Holz, lufttrocken:		Schamottesteine	1,85–1,95				
Buche	0,66–0,83	Schiefer	2,65–2,7				
Eiche	0,7–1,0	Schlacke von Koks	0,65				
Tanne	0,37–0,75	(trocken)	0,8				
Kalkmörtel, trocken	1,9–2,2	Schnee, lose	0,125				
Kalk, gebrannt, geschüttet	0,9–1,3	Ton, trocken	1,8				
Kalkstein, hart	2,45–2,8	Ton, frisch	2,4–2,6				
Kalksandstein	1,9–2	Torf, feucht	0,55–0,65				
Kies, naß, geschüttet	1,9–2,1	Vulkanfaser	1,28				
Kies, trocken, geschüttet	1,5–1,9	Zement, geschüttet	1,2–1,4				
Kohle, Stein-, geschüttet	0,72–0,86	Ziegel, gewöhnliche	1,4–1,7				

	Grobporen		Mittelporen in Vol.-%	Feinporen in Vol.-%	Wasserleitfähigkeit in cm/d
	weite in Vol.-%	enge in Vol.-%			
Sandböden	10 bis 20	8 bis 20	10 bis 15	2 bis 8	300
Schluffböden	0 bis 10	5 bis 15	10 bis 20	10 bis 20	30
Lehmböden	5 bis 10	0 bis 10	5 bis 15	5 bis 20	30
Tonböden	0 bis 5	0 bis 5	10 bis 15	25 bis 40	3
Torfböden	7 bis 30	0 bis 10	30 bis 55	15 bis 25	200

Abb.14-2: Porenvolumen (Porengrößenbereiche) für die Bodenarten-Hauptgruppen.

Das Porenvolumen bezeichnet das gesamte, mit Luft oder Wasser gefüllte Hohlraumvolumen des Bodens. Quelle: Wikipedia

4.2.5 Verdichtbarkeit, Lagerungsdichte, Proctorversuch (DIN 18126, DIN 18127)

Die i.d.R. geringe Vorbelastung eines Lockergesteinsbodens vor der Bebauung führte zu einer elastischen und reversiblen Verformung. Eine weitere Belastung über die Vorbelastung hinaus führt zu einer bleibenden plastischen Bodenverformung durch eine Scherung gegeneinander mit dem Ausquetschen des Wassers und mit einer Einregelung der Bodenpartikel (Elastizitätsgrenze). Diese „**Verdichtung**“, also die Verminderung des Bodenvolumens, ist mit einer Zunahme der festen Phase und mit einer Abnahme der gasförmigen und der flüssigen Phase im Boden verbunden und ist eine der wichtigsten Maßnahmen im Erdbau. Die durch Gletschereis belasteten glazialen Böden, z.B. in Oberschwaben, sind stärker vorbelastet und überkonsolidiert. Die Tragfähigkeit von Lockergesteinsböden kann durch geeignete Verdichtungsmaßnahmen (Stampfen, Walzen, Vibration) erhöht werden. Damit wird eine höhere **Lagerungsdichte (D)** erreicht. Die Lagerungsdichte bindiger und nichtbindiger Böden gibt den Grad der Verdichtung und den Porengehalt eines Bodens innerhalb der für diesen Boden möglichen Grenzen an und wird in genormten Laborversuchen ermittelt. Zur Beurteilung, ob ein Boden locker oder dicht gelagert ist, müssen die Extremwerte für den Porenanteil und für die Trockendichte bekannt sein. Ein Boden lässt sich in dem Maße verdichten, in dem es gelingt, seinen Porenanteil zu verringern (Grobporen nehmen ab, Feinporen nehmen zu) und damit seine Dichte zu erhöhen. Bodenverdichtung führt auch zur Verminderung des Luftporengehalts, der Durchlässigkeit (DIN 18130) und zu einer Umordnung der Bodenpartikel. Damit werden die Tragfähigkeit, die Scherfestigkeit, die Steifigkeit und die Standsicherheit (z.B. gegen Kippen) erhöht und somit eine Vorwegnahme der Setzung und eine höhere Belastbarkeit des Bodens erreicht. Die Neigung, durch Wasseraufnahme zu quellen, wird herabgesetzt.

- **Nichtbindige Böden** sind bei hoher Ungleichförmigkeitszahl ($U > 6$) und bei weniger als 8% bindiger Beimengungen durch Rütteln unter statischer Last gut verdichtbar. Dabei werden die Körner in eine dichtere Packung umgelagert, wobei kleinere Körner die Poren zwischen größeren Körnern ausfüllen. Günstige Wassergehalte bei Kies 4 - 8 % und bei Sand 5 - 12 %. Nichtbindige Böden sind bei mindestens mitteldichter Lagerungsdichte tragfähig ($D \geq 0,3$ bei enggestuften Böden und $D \geq 0,45$ bei intermittierend oder weitgestuften Böden).
- **Weit/gutgestufte Korngemische** (sehr unterschiedliche Korngrößen in einer Bodenprobe) sind gut verdichtbar.
- **Enggestufte Korngemische** (nahezu gleiche Korngrößen) sind weitgehend verdichtungsunwillig, z.B. lassen sich **gleichförmige Sande mit einer steilen Kornverteilungskurve** nur schwer verdichten.
- **Runde Kornformen** sind besser verdichtbar als **eckige Kornformen**.
- **Grobkörnige, bindige Mischböden** mit Ton- und Schluffgehalten von 5 – 15 % lassen sich bei einem günstigen Wassergehalt gut verdichten, sind aber wasserempfindlich.
- **Bindige Böden, v.a. plastische Schluff und Tone und gemischtkörnige Böden** sind weniger gut bis schwer verdichtbar. Ihre Verdichtbarkeit ist stark von ihrem Wassergehalt, von der Korngrößenverteilung und von der Kornform abhängig. Die für die Verdichtung bindiger Böden optimalen Wassergehalte liegen bei Ton- und Schluffböden 2 - 4 % (Bodengruppen TL und TM) bzw. 3 - 6 % (Bodengruppe TA) unter der Ausrollgrenze (w_p).
- **Bindige Böden** werden bei Flächengründungen als tragfähig bezeichnet, wenn die Konsistenz mindestens steif ist ($I_c \geq 0,75$). Mit zunehmendem Wassergehalt im Boden nehmen die Reibungskräfte zwischen den Teilchen ab und die Verdichtbarkeit wächst. **Feinkörnige Böden wie Schluff und Ton, aber auch gemischtkörnige Böden mit $\geq 15\%$ abschlämmbaren Bestandteilen $\leq 0,063\text{ mm}$** geben bei Verdichtung kaum Wasser ab und sind wasserempfindlich.
- **Böden mit breiiger oder mit weicher Konsistenz** sind bedingt durch ihren zu hohen Wassergehalt nicht ordnungsgemäß verdichtbar.
- **Wassergesättigte Böden** lassen sich wegen der Inkompressibilität von Wasser nicht verdichten. Bei zu niedrigem Wassergehalt kann der Boden nachträglich Wasser aufnehmen, was zur Verminderung der Tragfähigkeit führt.

Beim optimalen Wassergehalt ist die Verdichtung am größten. Dieses Maß wird bei geschütteten Böden durch die größte Trockendichte (ρ_d) - die **Procordichte** (ρ_{Pr}) beschrieben. Das ist die höchste unter definierter Verdichtungsarbeit erreichbare Dichte eines Bodens bei optimalem Wassergehalt. Sie ist allerdings nicht die grundsätzlich höchste Dichte, die ein Boden einnehmen kann und dient als Referenzwert für die geforderte Verdichtung. Der optimale Wassergehalt bindiger Böden bei Verdichtung liegt im Übergangsbereich von der steifen zur halbfesten Konsistenz. Zur Beurteilung der erreichbaren oder erreichten Lagerungsdichte dient der **Proctorversuch** (DIN 18127). Beim Proctorversuch, der mit bindigen und nichtbindigen Lockergesteinen im Labor ausgeführt werden kann, wird die Lagerungsdichte bei verschiedenen Wassergehalten bei gleicher Verdichtungsenergie ermittelt. Damit wird der Anteil der Luftphase eines Bodens durch zusammenschieben der Feststoffteilchen und füllen der verbleibenden Poren mit Wasser auf ein Minimum reduziert. Die daraus konstruierbare bogenförmige Proctorkurve zeigt die erzielbare einfache Procordichte $\rho_{Pr}[\%]$ als maximale Trockenraumdichte ρ_d nach dem einfachen Verdichtungsversuch mit dem für die Verdichtung optimalen Wassergehalt w_{Pr} am höchsten Punkt der Kurve an. In der Praxis lässt sich daraus

erkennen, welcher Wassergehalt in einem Boden erforderlich ist, damit dieser optimal verdichtet und damit tragfähig gemacht werden kann. Der Wassergehalt wird dann auf der Baustelle durch Wässern oder Beimischen von gebranntem Kalk oder Zement verändert. Hohe Dichtewerte werden dabei auf der "trockenen Seite" der Proctorkurve erreicht. Auf der "nassen Seite" werden dagegen günstigere (geringere) Durchlässigkeitsbeiwerte erreicht. Der Verdichtungsgrad wird in Prozent der beim Proctorversuch maximal möglichen Dichte angegeben ($D_{Pr} = \rho_d / \rho_{Pr}$). Er dient als Bezugswert für die Lagerungsdichte, die man auf einer Baustelle erreichen kann oder erreicht hat. Durch gegenüber dem genormten Proctorversuch erhöhte Verdichtungsleistungen sind auch Proctordichten von über 100 % erreichbar. Häufig wird, in Abhängigkeit von der Bodenart, ein Verdichtungsgrad von mindestens 95 % oder mehr (bis 103 %) verlangt. Die im Erdbau erforderlichen Verdichtungsgrade sind in der ZTV E-StB (Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau) angegeben. Man unterscheidet statische Verdichtung durch Walzen und dynamische Verdichtung durch Stampfen und Rütteln. Je nach der Bodenzusammensetzung werden die passenden Verdichtungsgeräte eingesetzt (Vibrationsstampfer und -walzen, Fallplatten, Schafffußwalzen etc.). Die Bodenverdichtung wird auf der Baustelle oft mit dem sogenannten **Plattendruckversuch** (statisch oder dynamisch, DIN 18134) überprüft. Hierbei wird durch hydraulische Pressen eine Last stufenweise über eine Platte auf den Boden aufgebracht. Als Gegenlager dient ein entsprechend ausgerüstetes Fahrzeug. Aus den ermittelten Daten kann die Verdichtung berechnet werden. Die Mindestverdichtungsgrade für Bauwerke im Straßenbau zwischen 95 und 103 % werden in den ZTV E-StB 09 angegeben.

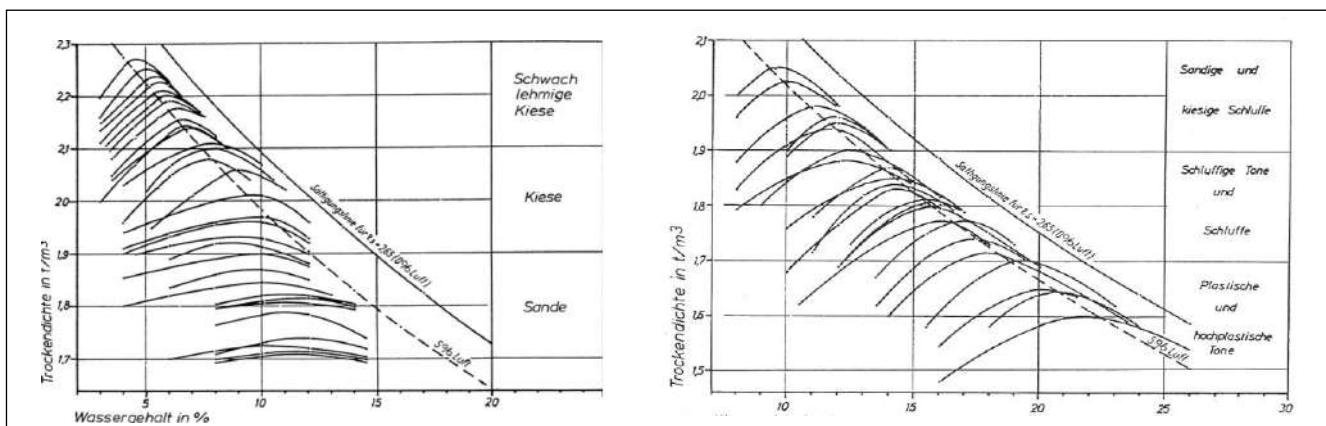
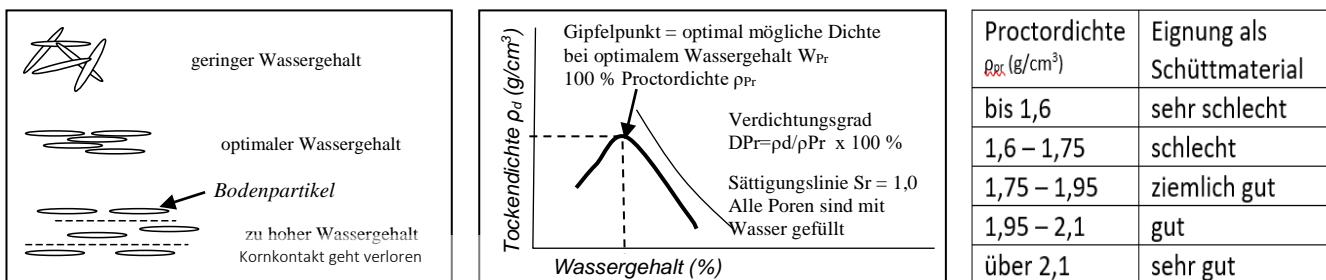


Abb. 14-3: Trockendichte und Wassergehalt, Proctorkurven von nichtbindigen und bindigen Böden.
Aus W. Dachroth 2017.

Klasse	Verdichtbarkeit	Bodenart	Bodengruppe (DIN 18196) Abkürzungen siehe Tab. 7
V1	leicht verdichtbar	nicht bindige bis schwach bindige Böden und grobkörnige und gemischtkörnige Böden	GW, GI, GE, SW, SI, SE GU, GT, SU, ST
V2	schwerer verdichtbar	bindige, gemischtkörnige Böden	GU*, GT*, SU*, ST*
V3	am schwersten verdichtbar	bindige, feinkörnige Böden	UL, UM, UA, TL, TM, TA

Abb. 14-4: Verdichtbarkeitsklassen für das Verfüllen von Leitungsgräben in der Verfüllzone (OK Leitungszone bis OK Planum) nach ZTVA-StB 89, Tabelle 2.

Bodengruppen der Verdichtbarkeitsklasse V1 sind insgesamt leichter verdichtbar als die Böden der Verdichtbarkeitsklassen V2 und V3. Bei Letzteren muss für eine gute Verdichtbarkeit der Einbauwassergehalt etwa dem optimalen Wassergehalt beim Proctorversuch entsprechen. Böden der Bodengruppen HN, HZ, F, OU, OT, OK und TA (Torfböden, Faulschlamm, organische Böden, ausgeprägt plastische Böden) sind für das Verfüllen von Leitungsgräben nicht geeignet.

Frostempfindlichkeit, Quellen und Schrumpfen wird in Kapitel 4.5.3 beschrieben.

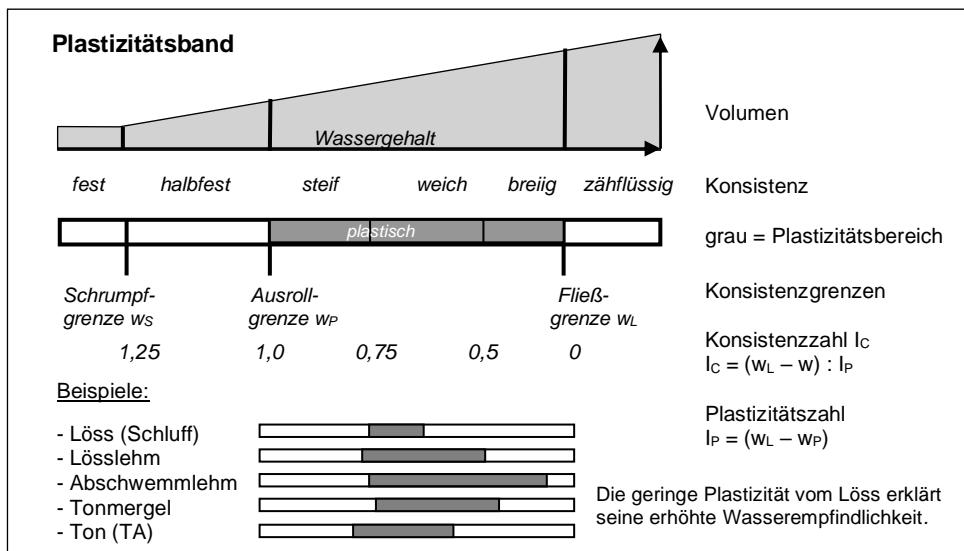
4.2.6 Konsistenz und Plastizität, Kornfraktionen (DIN 18122, DIN 18196, DIN ISO TS 17892-12, DIN EN ISO 14688 -1)

Die **Tragfähigkeit nichtbindiger Böden** wird vom Wassergehalt praktisch nicht beeinflusst. Für die Tragfähigkeit von bindigen Böden und für die Beurteilung der Empfindlichkeit bei Änderungen des Wassergehalts ist v.a. die Konsistenz (Zustandsform) maßgebend. Bei bindigen Böden ist der Wassergehalt für die Konsistenz des Bodens von großer Bedeutung. Die Kohäsion (c Haftfestigkeit) und die Tragfähigkeit bindiger Böden nehmen mit zunehmendem Wassergehalt ab. Bindige Böden sind bei hohem Wassergehalt zähflüssig bis breiig und gehen mit abnehmendem Wassergehalt in die weiche, steife und schließlich in die halbfeste und feste Konsistenz über. Je nach Korngröße und Kornverteilung haben bindige Böden bei unterschiedlichen Wassergehalten unterschiedliche Eigenschaften. Die Abgrenzung der Konsistenzen - **Fließgrenze, Ausrollgrenze, Schrumpfgrenze** - erfolgt durch Laborversuche. Mit der Kenntnis der Konsistenz des Bodens kann die zulässige Belastung, Setzung und Standsicherheit bindiger Böden (DIN 1054) ermittelt werden. Die Verwendbarkeit bindiger Böden ist ab einer Konsistenzzahl $I_c < 0,75$ ohne Bodenverbesserung gering (z.B. Lagerung zur Verringerung des Wassergehalts, Stabilisieren mit Kalk, Einrütteln von Grobkorn).

Konsistenzen Konsistenzgrenzen	Handversuch	Ungefährre Tragfähigkeit
zähflüssig	Boden fließt durch die Hände.	keine Tragfähigkeit
Fließgrenze (w_L)		
breiig	Boden quillt beim Pressen zwischen den Fingern hindurch.	ungünstig
weich	Boden ist leicht knetbar.	
steif	Boden ist schwer knetbar. 3 mm dicke Röllchen sind mit der Hand ohne Rissbildung formbar.	durchschnittlich
Ausrollgrenze (w_P)		
halbfest	3 mm Röllchen bröckeln, lassen sich aber wieder formen.	günstig
Schrumpfgrenze (w_s)		
fest	Boden bröckelt, ist hell und trocken und lässt sich nicht mehr formen.	

Blöcke	> 200 mm
Gerölle	200 - 63
Kies	
groß	63 - 20
mittel	20 - 6,3
fein	6,3 - 2
Sand	
groß	2 - 0,63
mittel	0,63 - 0,2
fein	0,2 - 0,063
Schluff	
groß	0,063 - 0,02
mittel	0,02 - 0,0063
fein	0,0063 - 0,002
Ton	
groß	0,002 - 0,00063
mittel	0,00063 - 0,0002
fein	< 0,0002 mm

Kornfraktionen, Korngröße



Der Bereich zwischen der Fließgrenze und der Ausrollgrenze wird Plastizitätsbereich (Bildsamkeitsbereich) genannt. Die Plastizität einer Bodenprobe kann im Plastizitätsband und im Plastizitätsdiagramm dargestellt werden. Je schmäler das Plastizitätsband, desto höher ist die Wasserempfindlichkeit der Probe.

Abb. 14-5: Konsistenzen und Konsistenzgrenzen nach Atterberg, Tragfähigkeit.

Das **Plastizitätsband** einer Bodenprobe markiert die Wassergehalte, bei denen sich die Probe im plastischen Bereich befindet (steif, weich, bieriig bzw. zwischen Ausroll- und Fließgrenze). Bei einem **breiten Plastizitätsband** bzw. hoher Plastizitätszahl I_p ist der Tongehalt hoch, der Sandanteil gering, die Kompressibilität ist erhöht, aber der Boden reagiert unempfindlicher auf Wasserzutritt oder Wasserverringerung (Quellung und Schrumpfung). Die Konsistenz ändert sich dann bei Wasserzutritt wenig. Steifemodul und Reibungswinkel sind gering. Der Boden ist daher setzungs- und rutschempfindlich. Ein **schmales Plastizitätsband** bzw. eine geringe Plastizitätszahl zeigt einen Boden mit einem geringeren Tonanteil, hoher Wasserempfindlichkeit, aber geringerer Setzungsempfindlichkeit und relativ guter Tragfähigkeit und Verarbeitbarkeit in steifem bis halbfestem Zustand.

Plastizität (Ton und Schluff)	Handversuch
Leichte Plastizität	Nach dem Ausrollen lässt sich kein zusammenhängender Klumpen bilden.
Mittlere Plastizität	Der gebildete Klumpen lässt sich nicht mehr kneten, er zerkrümelt bei Fingerabdruck.
Ausgeprägte Plastizität	Der nach dem Ausrollen gebildete Klumpen lässt sich kneten ohne zu bröckeln.

Abb. 14-6: Handversuch zur Bestimmung der Plastizität.

Eine Bodenprobe wird so lange in 3 mm dicke Rollen gewalzt und wieder zusammengeknetet, bis die Probe nicht mehr ausgewalzt, sondern nur noch geknetet werden kann.

Der Zustand eines bindigen Bodens wird durch die dimensionslose **Konsistenzzahl** ($I_p = (w_L - w_p) : I_p$) angegeben. Im Geotechnischen Bericht werden die Böden oft anhand des **Plastizitätsdiagramms** charakterisiert. Dabei wird die **Plastizitätszahl** (I_p) und der **Wassergehalt an der Fließgrenze** (w_L) in einem Achsenkreuz aufgetragen. Im Diagramm können u.a. leichtplastische Tone TL, mittelplastische Tone TM, ausgeprägt plastische Tone TA, Sand-Schluff-Gemische und organisch beeinflusste plastische Böden unterschieden werden. Tonböden ohne organische Beimengungen liegen oberhalb der empirisch bestimmten A-Linie. Schluffböden und organische Böden liegen unterhalb der A-Linie. Bei stark überkonsolidierten Tonen und Tonsteinen ist eine Zuordnung im Plastizitätsdiagramm nicht möglich.

- $I_p = w_L - w_p$ Wassergehalt an der Fließgrenze ($w_L \%$) Wassergehalt an der Ausrollgrenze ($w_p \%$)
- Hohes I_p = hoher Tongehalt, wenig Sand, geringes Wasseraufnahmevermögen.
- Niedriges I_p = hohe Wasserempfindlichkeit, rasche Änderung der Konsistenz bei Änderungen des Wassergehalts.

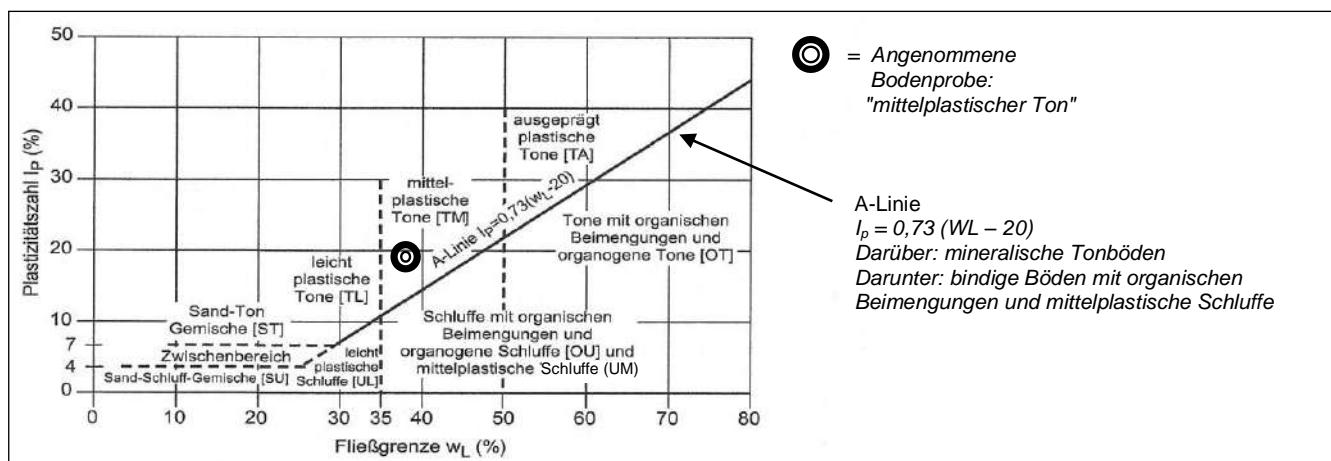


Abb. 14-7: Plastizitätsdiagramm nach Casagrande zum Benennen der Bodenarten.

Ergänzt aus Prinz & Strauß 2018.

4.2.7 Verwitterung

Durch den Prozess der **Diagenese** (Verdichtung, Entwässerung, Umkristallisation) wurden die ursprünglich recht locker gelagerten Sedimente (Sande, Tone, Karbonatschlämme etc.) nach ihrer Ablagerung mit der Zeit zu mehr oder weniger harten Gesteinen verfestigt. Diese Festgesteine werden von Trennflächen durchzogen, die teils durch tektonische Kräfte (Klüfte) und teils durch die Schichtlagerung (Materialwechsel bei der Ablagerung) entstanden sind. Durch die Erosion der überlagernden Schichten kommt es zur Druckabnahme im Gestein und zu breiteren Entlastungsklüften in Oberflächennähe und an den Talflanken. An diesen Trennflächen und an Kornkontakten beginnen die physikalische und die chemisch-biogene Verwitterung unter der Einwirkung von Temperaturunterschieden, Wasser, Kohlendioxid, Schwefel- und Salpeter- und anderen Säuren, Mikroorganismen, Wurzeln und warmen Klimabedingungen. Feldspäte (Primärsilikate) verwittern durch **Hydrolyse** zu Tonminerale (Sekundärsilikate). Anhydrit verwittert durch **Hydratation** zu Gips und Eisensilikate verwittern durch **Oxidation** in Eisenoxide (Limonit, Goethit und Hämatit). Karbonatgesteine gehen in kohlensaurem Regenwasser in **Lösung**. Gips und Salz **lösen** sich im Grundwasser und werden abgeführt. Bei der Verwitterung kommt es zu einer chemisch-mineralogischen Veränderung und Zersetzung der Gesteine, zu Farbveränderungen und zur Entfestigung. Die chemisch-biogene Verwitterung wird oberflächennah durch physikalische Gesteinszerlegung infolge von Temperaturwechsel, Entspannungen im Gestein, Frost- Salz- und Wurzelsprengung und durch Änderungen des Wassergehalts (Tonquellung) weitergeführt. Mit dem Fortschreiten der Verwitterungsprozesse zerfällt das Festgestein in ein zunehmend feinkörniges Lockergestein. Typisch ist, dass mit der Verwitterung eine Abnahme der Korngröße und der Dichte einhergeht. In magmatischen und metamorphen Gesteinen setzt die chemisch-biogene und die physikalische Verwitterung ebenfalls an Trennflächen und an Kornkontakten der gesteinsbildenden Minerale ein.

Man unterscheidet **verwitterungsbeständige Gesteine**, wie z.B. massive oder dickbankige Kalk- Dolomit- und Sandsteine, Grauwacken und z.T. Tonschiefer und **verwitterungsempfindliche Gesteine**, wie z.B. massive Ton- und Mergelsteine, oft in dünnbankigen Wechselfolgen. Dunkle, graue und grünliche Sedimentgesteine sind anfälliger gegenüber Verwitterungsprozessen als helle, rote oder violett-rote Sedimentgesteine. Besonders anfällig sind schwarz-graue Gesteine, die feinverteiltes Pyrit (FeS_2) enthalten. Gesteine, die von der Verwitterung schnell und stark beeinflusst werden, nennt man **veränderlichfeste Gesteine** oder **Halbfestgesteine** (Kap. 4.1.2). Die Wirkung von Wasser auf diese Gesteine wird mit dem Wasseranlagerungstest bestimmt und nach DIN EN ISO 14689-1 in Veränderlichkeitsklassen Grad 1 - 5 eingeteilt. Halbfestgesteine sind weit verbreitet. Zu ihnen gehören angewitterte Festgesteine mit Verlust der mineralischen Kornbindung und teilverfestigte Lockerfeste, z.B. Tonsteine, Mergelsteine und tonig gebundene oder bindemittelarme Sandsteine. Auch **Lockergesteine** unterliegen der Verwitterung. Löss verwittert unter dem Einfluss von Niederschlagswasser. Dabei wird der Löss (kalkhaltiger Schluff) durch Kalklösung und durch die Umwandlung der Primärsilikate in Tonminerale in Lösslehm (entkalkter, schluffiger Ton) umgewandelt. Durch bodenbildende Prozesse entstehen aus Lösslehm schließlich fruchtbare Braunerde, Parabraunerde und Schwarzerde.

Verwitterungsgrade für Ton-Schluffsteine nach Wallrauch und Moermann nach Einsele	V5 völlig verwittert W5 Bodenbildung	V4 stark verwittert W4 vollständig verwittert	V3 verwittert W3 stark verwittert	V2 mäßig verwittert W2 mäßig verwittert	V1 angewittert W1 angewittert	V0 unverwittert W0 unverwittert
Gesteinstyp	Boden, Locker-gestein	Halbfestgestein			Festgestein	
Zerlegung	ohne Gefüge	Restgefüge	Auflockerung an den Trennflächen ...vollständig/stark ...teilweise/schwach ...beginnend ...keine			
Bohrkern	grusig, bindig	blättrig;bröckelig/stückig		Kernstück, Kernscheiben	Vollkern	
Festigkeit nach DIN 1054, einaxiale Druckfestigkeit $q_{u,k}$ in MN/m ²	Boden	sehr mürb $< 1,25$	mürb-hart 1,25 - < 5,0 5 - < 12,5	mäßig hart 12,5 - < 50,0	hart > 50,0	sehr hart > 100
Wassergehalt %	25 - 30	20 - 25	16 - 19	13 - 15	10 - 12	7 - 9
Vorherrschende Verwitterung	chemisch und biologisch	beginnend chemisch und mechanisch, beginnend und zunehmend biologisch			keine	
Verwitterungsgrade für Festgesteine nach FGSV Merkblatt 532, EN ISO 14689-1	V5 zersetzt	V4 vollständig verwittert	V3 stark verwittert	V2 mäßig verwittert	V1 schwach verwittert	V0 frisch
Beschreibung	Das gesamte Gestein ist zu Boden zerfallen. Die Gebirgsstruktur und Gesteinstextur sind aufgelöst. Das Volumen ist stark verändert. Der Boden hat sich aber nicht wesentlich bewegt. (Rückstands-boden)	Das gesamte Gestein ist zersetzt oder zerfallen. Die ursprüngliche Struktur aber ist großteils noch unversehrt. (Verlust der mineralischen Bindung. Eigenschaft eines Locker-gesteins. Umwandlung der Tonminerale. Oft noch im Gesteinsverband oder Kluftkörper ohne Festgesteinseigenschaften.)	Mehr als die Hälfte ist zersetzt oder zerfallen. Frisches Gestein liegt als zusammenhängendes Steinskelett oder als Steinkern vor. (Das Gestein ist zerbrochen und entfestigt und zeigt vollständige Auflockerung an Trennflächen mit Mineral-umbildung und Verfärbung. Der ursprüngliche Gesteinsverband ist noch erhalten.)	Weniger als die Hälfte ist verwittert oder zersetzt. Frisches Gestein liegt als zusammenhängendes Steinskelett oder als Steinkern vor. (Das Gestein zeigt teilweise Auflockerung an Trennflächen.)	Verfärbung weist auf Verwitterung des Gesteins an der Oberfläche der Trennflächen hin. (Verwitterung einzelner Mineral-körper. Beginnende Mineral-umbildung.)	Kein sichtbares Zeichen der Verwitterung des Gesteins. möglicherweise leichte Verfärbung an Hauptoberflächen oder Trennflächen. (Keine Auflockerung an Trennflächen und keine Mineral-umbildung.)

Abb. 14-8: Verwitterungsgrade

Tabellen nach E. Wallrauch (1969), ergänzt nach C. Moermann (2007), nach G. Einsele et al. (1985) und nach FGSV/EN ISO 14689-1.

Gesteins-verwitterungsgrade in Anlehnung an FGSV-Merkblatt 543, DIN EN ISO 14689-1	Beschreibung, Erscheinungsbild	Kornbindung, Festigkeit, einaxiale Druckfestigkeit (q_u)	Feldversuch, Hammerschlag Rückprallhammer Rm
unverwittert VU	Keine sichtbare Verwitterung, keine oder schwache Verfärbung an Trennflächen.	Gute Kornbindung, sehr hart, hart, fest, sehr fest bzw. hoch. $q_u = 50 - 250 \text{ MPa}$	Mehrere Hammerschläge erforderlich, heller Klang, kein Schlagindruck.
angewittert VA	Gestein ist fest bis gering entfestigt, Verfärbung der Kluftwandungen und der angrenzenden Gesteinsbereiche, Variante: Gestein ist verfärbt aber fest. Beginnende Entkalkung.	Mäßige Kornbindung, mäßig hart - fest. $q_u = 25 - 50 \text{ MPa}$	Wenig heller Klang, evtl. leichte Einkerbung, mit wenigen Schlägen brechbar, nicht bis schwach ritzbar. $Rm = 20 \pm 10$
mäßig entfestigt VE	Gestein ist entfestigt (spürbar verändert) aber noch nicht mürbe. Verfärbung der Kluftwandungen und des Gesteins.	Geringe Kornbindung, mäßig fest, schwach absandend. $q_u = 5 - 25 \text{ MPa}$	Dumpfer Klang, Einkerbung bei festem Schlag, leicht zu zerschlagen, schwer ritzbar. $Rm < 10 - 15$
stark entfestigt VE	Gestein ist deutlich bis stark entfestigt. Starke Verfärbung der Kluftwandungen und des Gesteins.	Gestein ist brüchig, mürbe, absandend, halbfest. $q_u = 1 - 5 \text{ MPa}$.	Brüchig bei Hammerschlag, mit Hand zerbrechbar, gut ritzbar. $Rm = 0$
zersetzt VZ	Gestein ist völlig entfestigt oder zersetzt, Gesteinsgefüge ist jedoch erkennbar.	Steif - halbfest $q_u = < 1 \text{ MPa}$.	Von Hand zerdrückbar, in Wasser plastifizierend.
Boden	Mineralneubildung, strukturlos		

Abb. 14-9: Gesteinsfestigkeiten

Tabelle nach Prinz & Strauß (2018) in Anlehnung an FGSV-Merkblatt 543 und DIN EN ISO 14689-1.

4.2.8 Durchlässigkeit, kapillare Steighöhen (DIN 18130)

Boden und Gestein bieten durchfließendem Wasser einen Strömungswiderstand, der umso größer ist, je feinkörniger die Partikel und je enger die Poren und Klüfte sind. Die **Durchlässigkeit oder hydraulische Leitfähigkeit (k_f)** eines Bodens ist die Fließgeschwindigkeit von Wasser im Boden in m/s bei 10°C, abgeleitet nach dem Filtergesetz von Darcy. Die Durchlässigkeit in der wassergesättigten Zone variiert erheblich und hängt ab von der Korngröße, Kornform, Kornverteilung, dem Porenanteil, dem nutzbaren Porenanteil, von der Porengröße, von den Verbindungen zwischen den Poren und vom Wasseraufnahmevermögen. Tone und Schluffe sind sehr schwach bis schwach durchlässig, Sande und Kiese sind durchlässig bis stark durchlässig. Bei der **Durchlässigkeit von Fels** muss zwischen **Gesteindurchlässigkeit** - mit Ausnahme von grobporigen Sandsteinen sehr gering und **Trennfugendurchlässigkeit** unterschieden werden. Zusammen ergeben sie die **Gebirgsdurchlässigkeit**.

Für Lockergesteine können näherungsweise folgende k_f -Werte angenommen werden:	Kapillare Steighöhen:
<ul style="list-style-type: none"> • Kies $10^{-1} - 10^{-2} \text{ m/s}$ • Sand $10^{-3} - 10^{-5} \text{ m/s}$ • Schluffiger Sand $10^{-5} - 10^{-7} \text{ m/s}$ • Böden mit $> 10^{-2} \text{ m/s}$ sind sehr stark durchlässig. • Böden mit $10^{-2} - 10^{-4} \text{ m/s}$ sind stark durchlässig. • Böden mit $10^{-4} - 10^{-6} \text{ m/s}$ sind durchlässig. • Böden mit $10^{-6} - 10^{-8} \text{ m/s}$ sind schwach durchlässig (Lösslehm) • Ab $< 10^{-8} \text{ m/s}$ sind Böden sehr schwach durchlässig (Tonsteine), 	<ul style="list-style-type: none"> • Schluff $10^{-6} - 10^{-7} \text{ m/s}$ • Toniger Schluff $10^{-6} - 10^{-9} \text{ m/s}$ • Ton $< 10^{-9} \text{ m/s}$ <p>Kluftgrundwasserleiter haben oft $k_f 10^{-5} - 10^{-7} \text{ m/s}$. Karstgrundwasserleiter sind schwierig abzuschätzen und werden mit durchschnittlich 10^{-4} m/s mit Schwankungen von $10^{-2} - 10^{-8} \text{ m/s}$ angegeben. Karsthohlräume können durch Toneinschwemmungen verkleinert oder verschlossen sein.</p> <p>$k_f 10^{-7} \text{ m/s}$ bedeutet, dass auf einer Gesteinsfläche von 1 m^2 in einer Sekunde etwa ein Wassertropfen durchsickert.</p>

4.2.9 Verformungsverhalten, Setzungen und Scherfestigkeit (DIN 18135, DIN 18136, DIN 18137)

Der Boden unterliegt seit seiner Entstehung einem räumlichen **Eigenspannungszustand**. Bei Belastungsänderungen durch Bauwerke, Verkehrslasten oder Bodenabtrag verändern sich die Spannungen und es treten Verformungen durch Umlagerungen im Korngerüst auf. Die Kennwerte für die Verformbarkeit sind: **Elastizitätsmodul (E)**, **Steifemodul (E_s)**, **Verformungsmodul (E_v)**, **Bettungsmodul (k_s)** und **Schubmodul (G)** (in kN oder MN/m² bzw. m³). Die Module werden aus Labor- und Feldversuchen ermittelt (Druckversuch, Kompressionsversuch, Flügelsonde, Plattendruckversuch). Die Summe der Formänderungen in vertikaler Richtung unter einem beliebigen Spannungszustand heißt **Setzung = Zusammendrückung der Hohlräume, Umlagerung des Korngerüsts**. Man unterscheidet **Sofortsetzung (S₀)** bei Sand, Kies, **Konsolidationssetzung (S₁ Primärsetzung)** bei Ton, Schluff und **Langzeitsetzung (S₂ Sekundärsetzung)**. Die **Konsolidationssetzung** ist die baugrundtechnisch wichtigste Setzung. Nichtbindige Böden setzen sich unter statischer Last nur wenig und schnell, weil die Porenluft und das Porenwasser schnell entweichen bzw. abfließen können. Bei bindigen Böden können sehr große und längere Setzungen auftreten. Hier wird nach einer kurzen **Sofortsetzung** (Kompression der Bodenluft, Schubverformung bei wassergesättigten Böden) die Belastung zunächst vom nur sehr langsam abfließenden Porenwasser aufgenommen und es entsteht ein **Porenwasserüberdruck (p_w)**. Mit dem Abfließen des freien Porenwassers bis zum Hydrostatischen Druck verlagert sich die Belastung auf das Mineralgerüst und es kommt zu einer zeitlich gedeckten **Primärsetzung** in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens. Je weniger durchlässig der Boden ist, desto langsamer ist die Setzung. **Langzeitsetzungen (Sekundärsetzungen)** erklärt man mit

relativen Kornumlagerungen beim Auspressen von gebundenem Porenwasser sowie mit physikalisch-chemischen Vorgängen im Boden. Sie können v.a. bei Böden mit organischen Beimengungen oder in plastischen Tonen groß sein. Kleine und gleichmäßige Setzungen sind bautechnisch unproblematisch. Große und ungleichmäßige Setzungen können einen erheblichen Schaden verursachen. Bei Setzungsgefahr müssen die Fundamente verbreitert, tiefer eingebunden oder der Baugrund muss verbessert oder ausgetauscht werden. Eine frisch ausgehobene Baugrubenwand in bindigem Boden bleibt oft für kurze aber nicht abschätzbare Zeit ohne Absteifung senkrecht stehen. Ab einem bestimmten Böschungswinkel bleibt die Wand dauerhaft stehen. Das ist eine Folge der **Scherfestigkeit (τ_f)** von Boden und Fels, also die max. Schubspannung, die ein Festkörper tangentialen Scherkräften entgegensezten kann, $\tau_f = c + \tan\varphi \times \sigma$ in kN/m^2 , bzw. die maximale Scherspannung die vom Boden aufgenommen werden kann ohne zu versagen. Sie ist ein Maß für die Empfindlichkeit des Bodens gegenüber Spannungsänderungen. Sie ist abhängig von der Normalspannung σ (Auflast) und bei grobkörnigen Böden von der Kornform, Rauigkeit und Lagerungsdichte (Reibung). Bei feinkörnigen Böden ist die Scherfestigkeit vom Tongehalt, von der Art der Tonminerale (Reibung, elektr. Ladung) und von der Kohäsion abhängig. Die Scherfestigkeit gemischtkörniger Böden ist auch stark von der Kornverteilung abhängig. Hier ist oft eine Zunahme der Scherfestigkeit gegenüber den reinen Bodenarten festzustellen. Die Scherfestigkeit eines Bodens wird durch Laborversuche ermittelt (Rahmenscherversuch, Triaxialversuch, Großscherversuch). Die **Kohäsion (c und c' Haftfestigkeit)** und der innere **Reibungswinkel (φ und φ')** sind die sogenannten **Scherparameter**. Bei nichtbindigen Böden wird keine Kohäsion angesetzt. Die Kohäsion bindiger Böden kann sich mit der Zeit aus verschiedenen Gründen ändern. Bei feinkörnigen Böden lassen höhere Gehalte an quellfähigen Tonmineralen die Scherfestigkeit abfallen. Bei Überschreiten der Scherfestigkeit des Bodens besteht v.a. bei Flachgründungen **Grundbruchgefahr** (seitliches Wegbrechen des Bodens). Wenn die Schubspannung die Scherfestigkeit übersteigt, können Böschungsbrüche auftreten. Die Kennwerte für das Verformungsverhalten und für die Scherfestigkeit sind Voraussetzung für die Berechnung von Setzungen, von Standsicherheiten, für Erddruckberechnungen und für Grundbruchberechnungen. Die Scherfestigkeit von Fels ist eine komplexe Eigenschaft, die sich aus Anteilen des mehr oder weniger angewitterten Gesteins (Druckfestigkeit) und aus dem Reibungswiderstand auf Trennflächen zusammensetzt. Die Kohäsion wird hier durch mineralische Bindung und durch Verkittung verursacht.

4.2.10 Sohldruck, Sohldruckwiderstand (DIN 1054:2010)

Die **Sohlnormalspannung** (Kraft : Fläche, σ_0 in kN/m^2) bezeichnet die Druckspannung, die ein Fundament auf den Boden überträgt. Der **Bemessungswert der einwirkenden Sohlspannung** ($\sigma_{E,d}$ in kN/m^2) mit Teilsicherheitsbeiwert ist der Sohldruck, der zugelassen werden kann. Der **Bemessungswert des Sohlwiderstands** ($\sigma_{R,d}$ in kN/m^2) mit Sicherheitsbeiwert ist der Widerstand des Baugrundes. Die DIN 1054:2010-12 gibt **Bemessungswerte des Sohlwiderstands** für verschiedene Bodenarten an (Tabelle 5). Bei den in Tabelle 5 angegebenen Werten ist in bindigen Böden mit Setzungen von 2 – 4 cm, in nichtbindigen Böden mit 1 – 2 cm zu rechnen. Liegen die bodenmechanischen Eigenschaften außerhalb der Regelfälle in der Tabelle, muss nach Vorlage der Last- und Fundamentpläne durch Grundbruch- und Setzungsberechnungen der endgültig zulässige Sohldruck und ggf. erforderliche Sondergründung festgelegt werden. Der Sohldruck ist eine wichtige Größe zur Berechnung von Setzungen, Kippsicherheit, Gleitsicherheit und Grundbruch. Die einwirkende Sohlspannung muss kleiner oder gleich dem Bemessungswert des Grundbruchwiderstands ($\sigma_{E,d} \leq \sigma_{R,d}$). Die für die Ludwigsburger Böden charakteristischen Anhaltswerte zur Berechnung sind in Tabelle 2 und allgemein in Tabelle 5 dargestellt.

4.3 Gründung von Bauwerken

Unter der Gründung von Bauwerken versteht man die Art und Weise, wie die Bauwerkslasten und von außen wirkende Kräfte, wie z.B. Windlasten und Verkehrslasten, auf den Baugrund übertragen werden. Der Baugrund erleidet unter der Lasteinwirkung eines Bauwerks Verformungen, wobei zunächst eine **Verdichtung** eintritt, durch die seine Festigkeit und Tragfähigkeit verbessert werden. Wird die Scherfestigkeit des Bodens überschritten, kommt es auch zu seitlichen Druckbeanspruchungen mit **plastischen Deformationen** im Untergrund, was v.a. in bindigen Böden und bei kleiner Fundamentbreite und kleiner Einbindetiefe ab einer kritischen Bruchlast zum sogenannten **Grundbruch** mit einem schlagartigen und seitlichen Ausweichen des Bodens und zum Versinken oder/und Kippen des Fundaments nach unten oder zur Seite führen kann. Bei Gründungen im Grundwasser können darüber hinaus weitere Komplikationen auftreten, z.B. ein **hydraulischer Grundbruch**. Hier wird die effektive Spannung im Boden in der Baugrube durch aufwärts strömendes Grundwasser reduziert, bei null verhält sich der Boden wie eine Flüssigkeit, Bodenkörper werden weggeschwemmt, der Boden bricht auf. Bindige Lockergesteine mit quellfähigen Tonmineralen und mit hohem Wassergehalt sind stark setzungsempfindlich. Tonige Locker- und Festgesteine im Hangbereich neigen bei Wasserzufluss, bei zusätzlicher Belastung oder bei der Entfernung der Hangbasis zu Rutschungen, z.B. der Knollenmergel. Bei Eingriffen in das Grundwasser kann es v.a. in Tallagen zum Zutritt von erheblichen Grundwassermengen kommen. Bei der dann notwendigen Wasserhaltung während der Bauzeit dürfen Nachbarbauwerke nicht beschädigt bzw. beeinträchtigt werden (Absenkungstrichter, Porenwasserdruck, Setzungsgefahr von bindigen Böden, Austrocknung etc.). Die Art der Gründung eines Bauwerks ist daher von großer Bedeutung für dessen Standsicherheit und Nutzungsdauer (Setzung, Senkung, Hebung, Verschiebung, Verkipfung, Rissbildung, Dichtheit, Auftrieb, Sicherheit bei Erdbeben etc.). Je nach Bodenaufbau und Grundwassersituation, Bauwerkslasten, Bauwerksnutzung und Bauwerksausmaßen müssen geeignete Gründungsmaßnahmen getroffen werden. Sehr wichtig ist die **Gründung in bodenmechanisch gleichartigen Schichten** zur Vermeidung von unterschiedlichen Setzungen. Baugruben sollen so kurz wie möglich offen stehen und die Böschungen müssen zum Schutz vor Austrocknung mit Folie oder mit Spritzbeton abgedeckt werden, auch bei Fels. Durch Regen aufgeweichte Bereiche und durch Frost beeinflusste Bereiche der Baugrubensohle müssen ausgehoben werden. Immer auf eine gute Ableitung von Regen-, Oberflächen-, Schicht- und Grundwasser achten, bzw. deren Zutritt minimieren oder verhindern!

4.3.1 Flachgründung (DIN 1054)

Bei einer Flachgründung werden die Bauwerkslasten auf horizontalen Flächen in die tragfähigen Bodenschichten des oberflächennahen Baugrunds übertragen. Die Gründungstiefe wird von der Frostfreiheit, der Standsicherheit und von der Konstruktion bestimmt. Die Fundamente von Bauwerken sollten wegen der Frost- und Schrumpfsicherheit je nach den klimatischen Verhältnissen 0,8 – 1,5 m unter Gelände einbinden. Bei nichtunterkellerten Bauwerken ist Bodenfrost unter der Bodenplatte ggf. durch eine umlaufende Frostschürze aus Stahlbeton, durch Frostschutzmaterial oder durch einen Frostschirm zu vermeiden. Bei schrumpffähigem Boden ist tiefer zu gründen. Wärmedämmung beachten. Im Bereich von Tiefgarageneinfahrten ist nicht frostempfindliches Material der Klasse F1 (Kies oder Sandgemisch 0/40 oder Siebschutt) zu verwenden. Bei bindigem Baugrund muss mindestens eine dichte Lagerung gegeben sein. Bei bindigem Baugrund muss mindestens eine steife Konsistenz vorhanden sein. Bei ungeeignetem Baugrund kann, soweit wirtschaftlich vertretbar, ein Bodenaustausch oder eine Bodenverbesserung vorgenommen werden, oder es muss eine Tiefgründung vorgenommen werden (Kapitel 4.3.2).

a) Plattengründung und Wanne

Die Plattengründung (Fundamentplatte) ist eine unter dem gesamten Bauwerk durchgehende, bewehrte Lastübertragungsplatte, die je nach Konstruktionshöhe verhältnismäßig biegsam ist und die Last gleichmäßig verteilt (Flächenlast). Sie eignet sich besonders bei inhomogenen Bodenverhältnissen und mäßiger Tragfähigkeit. Tragende Fundamentplatten kommen bei Gebäuden ohne Keller und bei unterkellerten Gebäuden zum Einsatz und bewirken eine Vergrößerung der Aufstandsfläche, bzw. eine Verkleinerung des Verhältnisses "Last zu Fläche". Eine Fundamentplatte schützt das Haus in gewissen Grenzen vor Eigenbewegungen des Bodens, z.B. bei Frost oder Austrocknung. Sie gleicht also Verformungsunterschiede aus und verhindert Setzungen und Risse, wie sie bei Einzelfundamente durchaus vorkommen können. In weichen oder rutschempfindlichen Bereichen und in quartären Tal- und Hangablagerungen bis 180 kN Sohldruckwiderstand kann das UG als biegesteifer Stahlbetonkasten gebaut werden und muss bei Grundwasserzutritt zusammen mit den Kellerwänden als **wasserdichte und auftriebssichere Wanne** ausgeführt werden. Ggf. ist auf eine ausreichende Hangentwässerung zu achten. Fundamentplatten und wasserdichte Wannen sind in der Herstellung teurer, als Streifenfundamente mit Kellerwänden. Bei besonderen Anforderungen kommt eine kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) in Frage (Abb. 17a). Bei oberflächennahen Gründungen ist ein geeigneter **Frostschutz** mindestens 80 cm tief einzubauen.

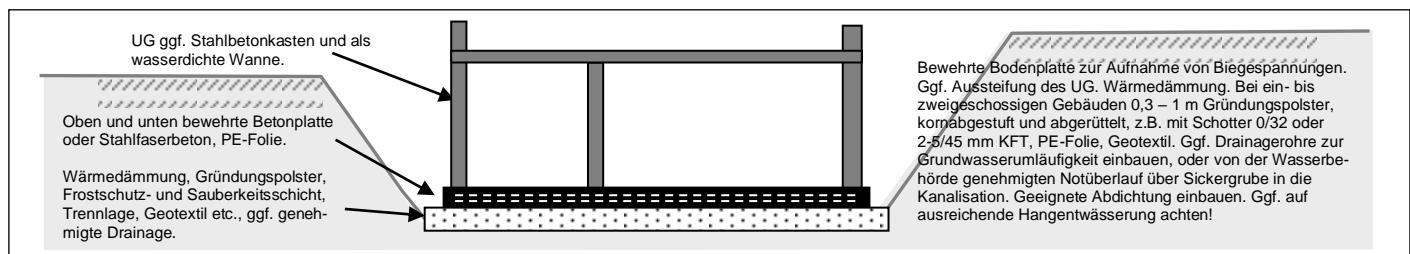


Abb. 15: Plattengründung z.B. in nichtbindigen oder sehr unterschiedlichen Böden

Druck, Spannung, Dehnung

Druck ist ein Skalar, d.h. ein Wert mit einem Betrag, der sich auf einer Skala darstellen lässt, aber keine eigene Richtung hat.

Spannung bezeichnet einen Betrag, der in einer bestimmten Richtung wirkt, Druck-, Zug- und Scherspannung. Eine Spannung kann als Vektor dargestellt werden, z.B. grafisch als Pfeil. Die Länge des Pfeils stellt den Betrag der Spannung dar, und sein Winkel ihre Richtung. Die **mechanische Spannung σ (sigma)** bezeichnet die Kraft pro Flächeneinheit, die auf eine beliebig geneigte, gedachte Schnittfläche wirkt. Eine Spannung kann aus mehreren speziellen Spannungen zusammengesetzt werden, die als Vektoren addiert werden. Wirkt eine Spannung senkrecht, d.h. normal zur Fläche, heißt sie **Normalspannung (σ_N)** und entspricht dem **Druck p** . Wirkt sie tangential zur Fläche, heißt sie **Schubspannung** oder **Scherspannung τ (tau)**. Eine ruhende (statische) Flüssigkeit kann keine Reibung und somit keine Scherspannung entwickeln, sondern nur einen **hydrostatischen Druck**. Eine Flüssigkeit, die in Bewegung ist, entwickelt jedoch eine **hydrodynamische Spannung**, welche Reibung, Staudruck und Auftrieb bewirkt, letztere zusätzlich zum allfälligen statischen Auftrieb. Somit ist ein Wehr stärker beansprucht als ein Damm. Flüssigkeiten können auch **Oberflächenspannungen** haben. Diese sind nur bei kleinen Dimensionen wirksam und bewirken z.B. die **Saugwirkung** eines Schwamms oder eines feinkörnigen Bodens. Der **Druck p** bezeichnet die Kraft pro Flächeneinheit, die senkrecht oder normal, d.h. im rechten Winkel, auf eine Fläche wirkt. Der Druck hat keine Richtung, d.h. in jeder Richtung denselben Wert, nämlich den Betrag der **Normalspannung σ_N** . Dies ist im Fall des hydrostatischen Drucks einer Flüssigkeit, z.B. Wasserdruk, leicht überprüfbar. Die durch eine Flüssigkeit auf eine Fläche ausgeübte Kraft ist immer gleich, egal ob die Fläche horizontal, vertikal oder schräg angeordnet ist. Sogar nach oben wirkt die Kraft; dies ist der statische Auftrieb, welcher z.B. ermöglicht, dass ein Schiff oder eine Eisschicht auf dem Wasser schwimmen. Alle Böden besitzen eine innere Reibung und manche auch eine Kohäsion. Dadurch können sie, anders als Flüssigkeiten, bis zu einem gewissen Grad mechanische Spannungen aufnehmen. Die Berechnung beliebiger räumlicher Spannungen ist recht kompliziert, kann jedoch oft quasi-zweidimensional erfolgen. Weitere Vereinfachungen ergeben sich, wenn die Achsen des gewählten Bezugssystems den Richtungen der sogenannten Hauptspannungen entsprechen. Diejenige Spannung mit dem höchsten Betrag wird die erste Hauptspannung σ_1 genannt, diejenige mit dem kleinsten Betrag σ_3 . Im Boden entsprechen meistens σ_1 der Normalspannung σ_N und σ_3 der Scherspannung τ .

Quelle: Th. Schmidt (2016): GEOTECHNIK UND STATIK BEI TROCKENMAUERN. Rechnerische Ergänzungen und technische Exkurse zum Buch "Trockenmauern, Grundlagen, Bauanleitung, Bedeutung" der Stiftung Umwelt-Einsatz Schweiz.

Dehnung ist eine Längenänderung als Reaktion auf eine Belastung. Man unterscheidet die **elastische Dehnung**, bei der sich das Gestein verformt, aber wieder in seine ursprüngliche Form zurückkehrt, wenn die Belastung weggenommen wird und die **plastische Dehnung** ohne die Rückkehr zur ursprünglichen Form (duktil Verformung). Drücke, Spannungen, Dehnungen und Brüche mit Sprödverformung spielen zusammen mit der Temperaturerhöhung in der Erdkruste (Metamorphose) in der Tektonik und speziell bei Plattenbewegungen, bei Erdbeben und bei Gebirgsbildungen eine wichtige Rolle.

b) Aufgelöste Flachgründung, Fundamentvertiefung

Ab steifer Bodenkonsistenz in bindigen Böden sind im allgemeinen Streifenfundamente (Linienlast) oder bei geringer Belastung, bzw. bei Hallenkonstruktionen auch Einzelfundamente (Punktlast) mit einer geeigneten Armierung und Anschlussbewehrung möglich. Auf den ausreichend breit, tief und frostsicher zu dimensionierenden und entsprechend zu bewehrenden Betonfundamenten werden die tragenden Kellerwände, bzw. die Hallenstützen aufgebaut und die Last des Bauwerks wird in den Boden abgetragen. Zwischen den Fundamenten wird eine nichtragende Kellerplatte eingebaut. Die Fundamente müssen frostsicher und mindestens 0,5 m tief unter die Baugrundsohle einbinden. Weiche Bereiche müssen durch Magerbeton ausgetauscht, oder durch Fundamentvertiefung, z.B. Pfeiler- oder Brunnengründung durchteuft werden (vertiefte Flachgründung). Wichtig ist eine mittlere und lotrechte Fundamentbelastung. Fundamente für Bauwerke müssen immer in Böden mit gleicher Konsistenz ge-gründet werden. Das gilt besonders bei Bauwerken am Hang, wo ggf. an der Talseite eine abgetreppte Fundamentvertiefung erfolgen muss, damit in einer Bodenschicht mit der gleichen Tragfähigkeit wie an der Hangseite gegründet werden kann. Oft ist in Hanglagen eine steife Ausbildung des Untergeschosses notwendig. Bei Nichtbeachtung kann es zu ungleichmäßigen Setzungen und zu Bauwerksschäden kommen (Kapitel 4.3.4). Fundamentvertiefung und Bodenaustausch lohnen sich oft nur bei kleinen Kubaturen. Der ausgehobene Boden wird durch nichtbindiges Material oder durch Magerbeton ersetzt, die in Lagen von 30 - 40 cm eingebracht und verdichtet werden. Vorsicht vor Grundwasserzutritt und Bodenaufweichung. Bei tiefen oder steil geböschten Baugruben oder bei wenig standfesten Böden kann ein geeigneter Verbau erforderlich werden.

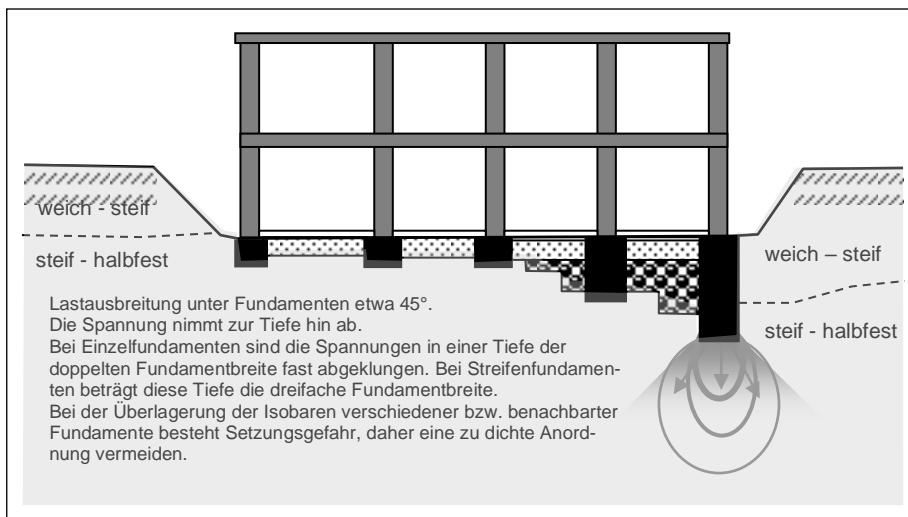


Abb. 16: Streifen(rost)fundamente, Bodenaustausch und vertiefte Flachgründung, Pfeiler- oder Brunnengründung in bindigem Boden mit steifer Konsistenz.

4.3.2 Maßnahmen zur Verbesserung von wenig tragfähigem Untergrund (Beispiele)

Sind bei einer Flachgründung zu große oder ungleichmäßige Setzungen zu erwarten oder sind sehr hohe Lasten abzuleiten, muss eine Bodenverbesserung oder eine Tiefgründung (Kap. 4.3.3) vorgenommen werden. Dabei muss im Einzelfall geprüft werden, welche Maßnahme technisch durchführbar und wirtschaftlich sinnvoll ist.

- A. Mechanische Bodenverbesserung
 - 1. Einrätteln oder Einschlagen von geeigneten Baustoffen (Stopfsäulen, Rüttelstopfverdichtung, CSV-Verfahren)
 - 2. Verbessern von Schluffen und Tonen durch Einfräsen von Grobkorn
 - 3. Einmischen einer bestimmten Bandbreite an Kornfraktion z.B. bei GE- oder SE-Böden
- B. Maßnahmen ohne Bodenaustausch
 - 1. Vorbelastung und Liegezeit
 - 2. Einbau im Sandwich-Verfahren
 - 3. Einbau von Geokunststoffen als Bewehrung, Drainage, Trennschicht o.ä.
 - 4. Einbau von Leichtbaustoffen
 - 5. Wasserhaltung und Drainagen
 - 6. Dynamische Intensivverdichtung (Fallplatten o.ä.)
 - 7. Tiefenverdichtung (Rütteln und Stopfen)
 - 8. Einsatz von Bindemitteln (Zementinjektion, Dämmersuspension, Silikatlösung, Weichgel, HDI-Säulen, MIP etc.)
- C. Boden ist nicht verdichtungsfähig
 - 1. Teilweises oder vollständiges Entfernen von ungeeigneten Böden und Rückverfüllung mit geeigneten Baustoffen (Magerbeton). Lagenweise Verdichtung, Grundwasser > 0,5 m unter Aushubsohle, ggf. zusätzliche Bewehrung.

Wichtig im Zusammenhang mit Maßnahmen zur Verbesserung wenig tragfähiger Böden ist, dass der Bauherr dies, beraten durch seinen Architekten, anzuordnen hat. Damit bleibt die Haftung der Funktionstüchtigkeit bei ihm. Die bauausführende Firma ist dann nur für die einwandfreie Bauweise verantwortlich. Fachfirmen sind jedoch nicht von der Hinweispflicht entbunden. Bei der Bauwerksgründung sind auch zahlreiche, meistens firmenspezifisch zugelassene Mischformen möglich, die oft unter dem Begriff „Baugrundverbesserung“ geführt werden. Ansatz ist dabei die sog. **„Ertüchtigung des Baugrunds“**, wobei dessen bodenmechanische Eigenschaften so verbessert werden, dass eine Gründung vorgenommen werden kann, die das Bauwerk schadensfrei hält. Diese Methoden befinden sich außerhalb von Normen bzw. Regelwerken und müssen auch im Konsens mit der Tragwerksplanung konzipiert werden. Die verschiedenen Methoden besitzen entweder generelle Zulassungen oder es muss jeweils eine Zulassung für den Einzelfall beantragt werden. Beispiele aus dem großen Spektrum sind: Bodenaustausch, Verdichtung, Vorbelastung, Rüttelsäulen, Entwässerung, Coplan-Stabilisierungs-Verfahren (CSV), Stabverpresspfähle, Gefrierverfahren und v.a. bei Sand- und Kiesböden Injektionen mit unterschiedlichen Materialien etc..

4.3.3 Tiefgründung, Pfahlgründung (DIN 1054, DIN EN 1536, EN 12699, EN 12794, EN 14199)

Bei der Tiefgründung werden die Lasten durch lastübertragende Stützelemente auf tiefer liegende und tragfähige Schichten abgetragen, wenn die oberflächennahen Schichten nicht tragfähig und ein Bodenaustausch unwirtschaftlich ist. Die Lastabtragung erfolgt punktuell über die Pfahlfußfläche und über den Spitzendruck als stehende Gründung, (*große Last auf kleine Fläche*) oder, falls keine tragfähige Schicht erreicht wird, schwebend/schwimmend über die Mantelreibung am Pfahlschaft (*große Last auf größere Fläche*). Die Anzahl der Pfähle richtet sich nach der Belastung und der Gebäudegröße. Hier ist auch die sogenannte "negative Mantelreibung" zu beachten: Der Boden setzt sich und zieht den Pfahl mit nach unten. Es gibt auch kombinierte Pfahl-Plattengründungen (KPP), wo tiefe Pfähle und die flache Platte zur Lastverteilung herangezogen werden. Tiefgründungen bis in das Grundwasser sind bei der zuständigen Wasserbehörde anzeigen- und genehmigungspflichtig.

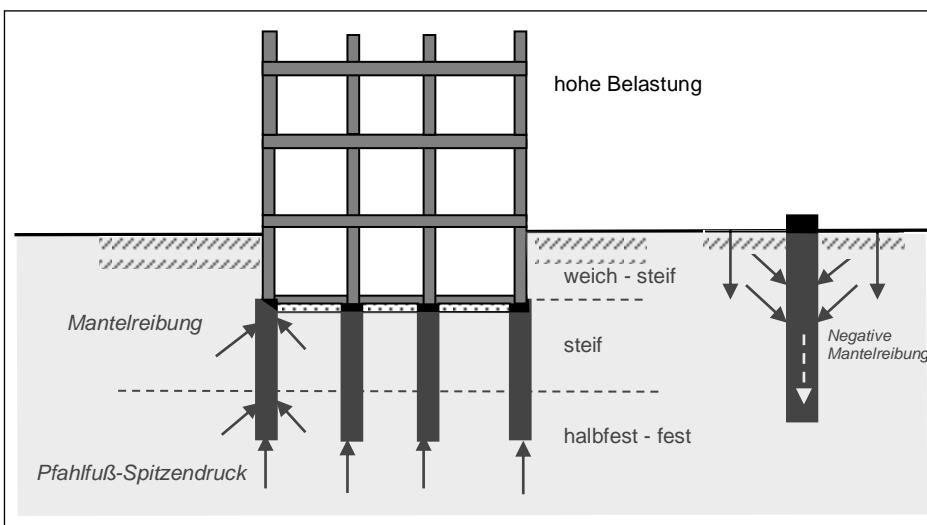


Abb. 17: Bohrpfahlgründung mit hoher Sohldruckspannung auf tiefliegende Bodenschicht mit fester Bodenkonsistenz oder harter Festigkeit (Fels)
(die Pfeile verdeutlichen die Kräfte)

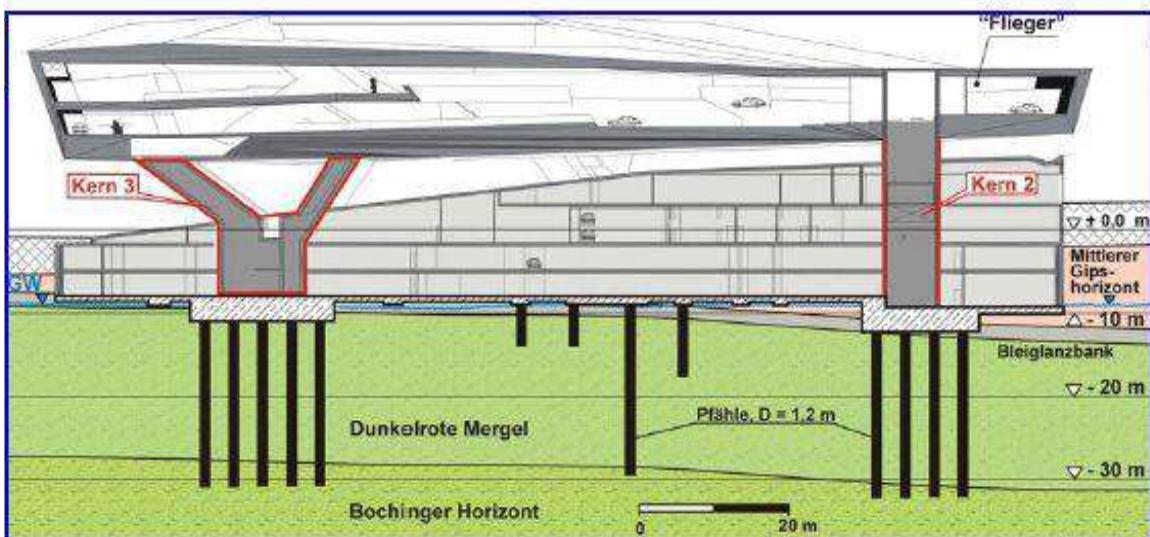


Abb. 17a: Kombinierte Pfahl-Plattengründung des Porsche-Museums in Stuttgart-Zuffenhausen in den veränderlich festen Gesteinen (Schlufftonsteinen) des Gipskeupers.

Aus: C. Moermann 2007.

Bei Pfahlgründungen unterscheidet man:	Nach der Herstellungsart unterscheidet man:
<ul style="list-style-type: none"> • Bohrpfähle, (DIN EN 1536) • Großbohrpfähle, Brunnen- und Senkkastengründung • Rammpfähle (Verdrängungspfähle) • Verpresspfähle, Kleinbohrverpresspfähle (Mikropfähle, DIN 14199) • Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) • Verschraubungspfähle 	<ul style="list-style-type: none"> • Ortpfähle • Fertigpfähle • Schlitzwände
Nach der Krafteinleitung unterscheidet man:	Die bevorzugten Materialien sind:
<ul style="list-style-type: none"> • Spitzendruckpfähle, die die Kraft überwiegend über den Pfahlfuß in den Boden einleiten (stehende Pfhäle). • Reibungspfähle, die die Kraft überwiegend über den Pfahlmantelwiderstand in den Boden einleiten (schwebende/schwimmende Pfahlgründung). • Zugpfähle, die die Kraft ausschließlich über den Mantelwiderstand abtragen, z.B. zur Auftriebssicherung. 	<ul style="list-style-type: none"> • Stahl • Stahlbeton • duktile Gusseisen • früher Holz

Bohrpfähle

sind **Ortbetonpfähle**, ggf. mit Bewehrungskorb mit ca. 0,3 – 0,6 m Durchmesser, die oft verrohrt oder unverrohrt mit Schneckenbohrern gebohrt werden. Nach DIN 1041 Herstellung als Pfahlbündel, ggf. Verbindung über Pfahlroste als Gründungsbasis. Eine **Bohrpfahlwand** besteht aus aneinander gereihten Bohrpfählen zur Baugrubensicherung und ggf. zur Abdichtung gegen Grundwasserzutritt. Von Vorteil sind die geringe Lärmbelästigung, die geringe Erschütterung und die Kenntnis des durchfahrenen Profils. Von Nachteil sind die mögliche Auflockerung nichtbindiger Schichten und die geringere Tragfähigkeit gegenüber Ortbetonrammpfählen. Pfähle mit kleinem Durchmesser (0,1 - 0,3 m) werden **Mikropfähle** genannt. Sie werden oft in begrenzten Verhältnissen gerammt oder gebohrt (Unterfangung etc.). Hier wird Stahl mit Beton oder Verpressmaterial eingesetzt, z.B. GEWI-Pfähle, TITAN-Pfähle, hydraulische Pressrohrpfähle zur Unterfangung.

Großbohrpfähle, Senkkästen (Brunnengründung)

Der Durchmesser von Großbohrpfählen liegt bei 0,6 bis über 2 m und sie sind für sehr hohe Lasten und für große Tiefen (> 40 m) geeignet. Wichtig für das spätere Setzmaß ist die Säuberung der Bohrlochsohle. Es gibt Systeme mit Schneckenbohrung, Greifer und Fallmeißel. Senkkästen können deutlich größer sein und können bei Grundwasserzutritt oder in Gewässern als geschlossenen Drucksenkästen (Caissons) eingesetzt werden.

Rammpfähle (Verdrängungspfähle)

bestehen vorgefertigt aus Stahlbeton, Stahl oder aus Gusseisen (duktiler Gussrammpfahle mit Steckmuffen, ggf. mantelverpresst). Sie werden in den bindigen Boden eingerammt oder werden als **Ortbetonrammpfähle** z.B. "System Franki" vor Ort hergestellt. Hier sind Erschütterungen benachbarter Gebäude besonders zu beachten. Der Durchmesser beträgt ca. 30 – 65 cm. Sie sollen mindestens 3 m in tragfähige Schichten einbinden (halbfest oder fest). Rammpfähle werden oft in weichen oder organischen Böden angewendet und haben eine hohe Tragfähigkeit über den Spitzendruck oder über die Mantelreibung. In früheren Zeiten wurden Holzpfähle verwendet, die im Grundwasser nicht verrotten (Venedig).

Mit einer kombinierten **Pfahl-Plattengründung** lassen sich in geeigneten Fällen v.a. bei sehr hohen Bauwerken erhebliche Kosten einsparen (Abb. 17a).

Schlitzwände

Schlitzwände mit Bentonitstützflüssigkeit werden mit einem Spezialbagger Segment für Segment gezogen und ggf. mit einem Bewehrungskorb ausbetoniert. Die können abdichtende und/oder tragende Wirkung haben.

4.4 Bauen am Hang, Baugrubensicherung

Bauwerksgründungen am Hang sind komplizierter und i.d.R. teurer, als im flachen Gelände und auch die Erschließung kann teurer sein. Bei Hangneigungen über 15 % steigen die Kosten stark an. Ggf. kann auch auf Stelzen gebaut werden. Durch Bauaktivitäten wird der Gleichgewichtszustand eines Hanges zwischen antreibenden und haltenden Kräften gestört. Baugruben, Einschnitte, Abtragungen oder Aufschüttungen vergrößern die Scherspannung bzw. vermindern die Scherfestigkeit im Boden und destabilisieren den Hang. Auch Änderungen (Zunahme) der Wasserströmung und das Entfernen von Vegetation kann destabilisierend sein. Die Gleichgewichtssituation muss vor Baubeginn gutachterlich untersucht werden. Je steiler der Hang ist, desto höher sind die bautechnischen Anforderungen. Hier hat man es ab Hangneigung $\geq 9\%$ mit der Geotechnischen Kategorie 2 und in bestimmten Fällen auch mit GK 3 zu tun. Wichtig für die Planung sind ein geotechnisches Gutachten und eine exakte Höhenaufnahme. Je nach dem geologischen Untergrund besteht am Hang eine mehr oder weniger hohe Rutschgefahr, zumindestens der verwitterten oberen Bodenschicht und auch tieferer Schichten, oft schon ohne Bebauung. Das kann man oft am säbelartigen Wuchs der Bäume erkennen. Einige geologische Grundsichten, wie z.B. der im Raum Stuttgart anzutreffende Knollenmergel im Mittleren Keuper, können auch schwach verwittert problematisch sein und erfordern hohe Aufwendungen bei der Gründung, v.a. bei Wasserzufluss. In Ludwigsburg können die Schichten des verwitterten Gipskeupers, z.T. lösshaltige

Fließerden und lehmiger Hangschutt zu Rutschungen neigen. Kommt nach dem Mutterboden gleich der feste Fels, ist die Gründung bodenmechanisch oft günstig, aber wegen Meißen, Reißen und Fräsen mit höheren Aushubkosten verbunden. Zu beachten ist hier der Verwitterungsgrad und der Stand der Schicht- und Kluftflächen im Fels. Bei tiefer reichenden und verwitterten, bindigen Bodenschichten oder bei stark verwitterten Felsschichten, ist der Aushub günstig, aber die Herstellung der Standfestigkeit von Baugrube und Gebäude können hohe Kosten verursachen. Ungünstig ist es, wenn der Untergrund im Baufeld wechselt. Die frostfreie Gründung muss immer in bodenmechanisch gleichartigen Schichten und ggf. abgetrepppt nach oben oder unten oder als Tiefgründung (Bodenaustausch, Pfähle) erfolgen. Oft ist in Hanglagen eine steife Ausbildung des Untergeschosses (biegesteifer Stahlbetonkasten, ggf. wassererdicht) notwendig. Die Baugrubenwände müssen fachgerecht gesichert werden, z.B. mit Verbau und Standsicherheitsnachweis und müssen bei Wasserzutritt zusätzlich abgedichtet werden. Ggf. ist ein abschnittsweiser Aushub der Baugrube durchzuführen. Freie geböschte Baugrubenwände, auch Fels, müssen während der Bauzeit mit Folie oder mit Spritzbeton gegen Niederschlag und Austrocknung gesichert werden. Der **Entwässerung** gilt ein besonders Augenmerk beim Bauen am Hang. In Hangbereichen kann es beim Aushub zu Wasseraustritten kommen. Es kann sich um temporär zufließendes Oberflächenwasser (Regen) oder um mehr oder weniger permanent fließendes Schicht- und Grundwasser handeln. In diesem Fall ist unverzüglich der Gutachter hinzuzuziehen, denn das Wasser destabilisiert den Hang zusätzlich. Die Grundwasserstände schwanken mit den Jahreszeiten und in Abhängigkeit von Starkregenfällen und Schneeschmelzen und die Ergiebigkeit am Hang ist oft schwer abschätzbar. Wasseranstau am Bauwerk ist zu verhindern und das Gebäude ist mit Maßnahmen, wie Sicherheit gegen Auftrieb, Abdichtung und ggf. mit genehmigten Drainagen zu sichern. Die örtlichen Regeln und Genehmigungen zur temporären und dauerhaften Umleitung und Ableitung von Grund- und Sickerwasser sind zu beachten. Am Hang ist, v.a. bei größeren Bauvorhaben, die Ausspiegelung des Grundwassers in durchlässigen Schichten der Arbeitsräume zu beachten (Absenkung bzw. Aufhöhung des GW-Spiegels) oder es sind Grundwassersperren (Betonriegel, Lehmschlag) einzubauen. Damit können verschiedenen Teilen des Bauwerks verschiedene Bemessungswasserstände zugeordnet werden. Eine dauerhafte Grundwasserabsenkung bei Hanglagen ist zu vermeiden und wird i.d.R. nicht genehmigt, da es oberhalb des Bauwerks zu Schäden an Bauwerken und an der Vegetation kommen kann. Das gilt besonders bei hoch anstehendem Grundwasser und bei Wohn/Gewerbesiedlungen in Hanglagen. Hier muss das Grundwasser auch in den Gräben der Ver- und Entsorgungsleitungen im Hanggefälle mit Sperrriegeln aus Lehm oder Beton vor einer dauerhaften Absenkung geschützt werden. Ansonsten kann es zu einer weitreichenden Drainierung größerer Hangbereiche kommen, und in empfindlichen Böden kann das zu Bauwerksschäden durch Austrocknung und Schrumpfung führen. Die Entwässerungsmöglichkeiten sind vor Baubeginn prüfen! Beim Aushub und bei Aufschüttungen sind alte Auffüllungen, z.B. von ehemaligen Steinbrüchen und Lehmgruben auf dem Grundstück und im Umfeld zu beachten. Beim Aushub auf rutschempfindliche Schichten achten. Auch an sich standfeste und felsartige Grundschichten sind oberflächennah oft klüftig verwittert und können, z.B. bei Schichtfallen in Hangabwärtsrichtung, ins Rutschen kommen. Bei Aufschüttungen, auch talseitig, die zusätzliche Belastung des Hanges beachten. **Leitungen, v.a. Gas**, müssen so verlegt werden, dass sie bei leichten Hangbewegungen nicht abgetrennt werden. Bei Rutschgefahr muss der Hang stabilisiert werden, z.B. durch technische Abstützungen (Nägel, Anker, Mauer, Gabionen, Injektionen etc.).

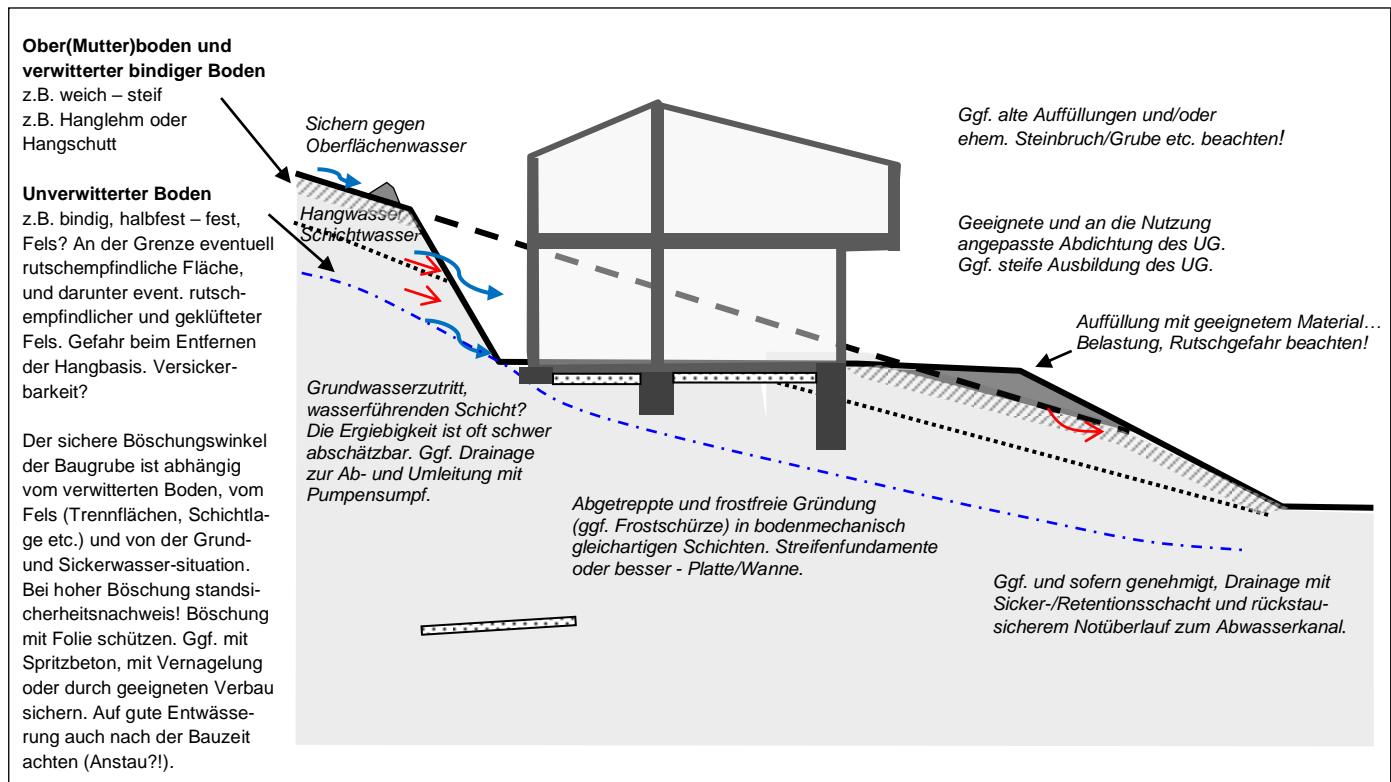


Abb. 18: Bauen am Hang (schematisches Beispiel)

4.4.1 Hangsicherung, Baugrubensicherung (DIN 4124)

Hänge und Baugruben müssen zum Schutz der Beschäftigten und zum Schutz benachbarter Bauwerke und Einrichtungen nach strengen Richtlinien hergestellt und gesichert werden. **Man muss wissen, dass auch bei sachgemäßer Baugrubensicherung minimale Bewegungen des Bodens durch Bohren, Rütteln, Rammen und durch Aushub in Form von Setzungen, Rissen und Wandverformungen, v.a. bei älteren Nachbarbauwerken, oft unvermeidbar sind.** Schon bei der Bauplanung müssen mögliche Bewegungen und die daraus resultierenden Kosten berücksichtigt werden. Gründliche **Voruntersuchungen** und eine **Beweissicherung** werden empfohlen. Immer Wasserzutritt und die Wasserableitung beachten.

Hangsicherung

Hangsicherungen sollen das Abrutschen und die Erosion, z.B. an Einschnitten von Straßen, Eisenbahntrassen, in Baugebieten etc., am Hang verhindern. Für Stützbauwerke an Hängen und Böschungen kommen eine ganze Reihe von Techniken in Frage, wie z.B. Betonstützmauern, Trockenmauern, Bodenvernagelung, Spritzwände, rückverankerte Stahlbetonelemente, Gabionen, Geokunststoffe, Bepflanzungen und Böschungsmatten etc. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von speziellen Abstütz- und Abdichtungssystemen für bestimmte Anwendungsbereiche und Kombinationsverfahren, z.B. Schlitzwand mit zusätzlicher Dichtungsbahn, Gefrierverfahren, Mixed in Place/Plant-Verfahren etc.. Dabei auf ausreichende Wasserdrainage achten. Die Stand-sicherheit des Verbaus und die Sicherheit gegen Aufbruch der Baugrubensohle ist nachzuweisen (DIN 1054, 4084).

Geböschte Baugruben

Baugruben und Gräben dürfen bis 1,25 m Tiefe ohne Sicherung mit senkrechten Wänden hergestellt werden, wenn die Geländeneigung bei mindestens steif-bindigen Böden $\leq 1 : 2$ und bei mindestens weich-bindigen oder nichtbindigen Böden $\leq 1 : 10$ beträgt. Ab einer Tiefe von $> 1,25$ m müssen Baugruben nach DIN 4124 geböscht oder abgestützt werden. Bis 1,75 m Tiefe dürfen Baugruben ohne Sicherung ausgehoben werden, wenn der mehr als 1,25 m über der Sohle anstehende Bereich der Erdwand unter dem Winkel $\beta \leq 45^\circ$ geböscht wird und wenn weiter Bedingungen eingehalten werden. Die Böschungsneigung ist von den Baugrund- und Grundwasserverhältnissen, bei bindigen Böden vom Wassergehalt des Bodens und von der Zeit, über welche die Baugrube offen zu halten ist, abhängig. Entlang der Baugrube ist ein lastfreier Streifen von $\geq 0,6$ m Breite, je nach Belastung auch mehr, einzuhalten. Für schmale Leitungsgräben gibt es spezielle Verbausysteme. Immer auf ausreichende Wasserdrainage achten. Falls die Böschung höher als 5 m ist oder die anderen Anforderungen (Böschungswinkel etc.) nicht eingehalten werden können, ist ein Standsicherheitsnachweis nach DIN EN 1997, DIN 1054 bzw. DIN 4084 zu erstellen.

Böschungswinkel (β) als Richtwerte bei Baugruben bis 5 m, bzw. bei weichen Böden bis 3 m Tiefe ohne rechnerischen Nachweis:

- Inhomogene, locker gelagerte Auffüllungen $\beta = 35^\circ$ - max. 45°
- Nichtbindige oder weiche bindige Böden $\beta = \text{max. } 45^\circ$
- Mindestens steife bis halbfeste bindige Böden $\beta = \text{max. } 60^\circ$
- Verwitterter und entfestigter Fels $\beta = 60^\circ$ - max. 70° (abhängig vom Grad der Verwitterung)
- Fester und maximal gering verwitterter Fels $\beta = \text{max. } 80^\circ$ (Raumstellung der Trennflächen und Schichtneigung beachten!)

Diese Werte gelten **nicht** bei Wasserzutritt z.B. durch Grundwasser, Schichtwasser, Sickerwasser etc.. Wasserzutritte, Quellwirkungen, Austrocknung und Frostwirkungen sind besonders zu beachten und zu bewerten. Die Böschung ist mit Kunststofffolie oder Spritzbeton zu schützen. Die Standsicherheit einer Böschung ist rechnerisch nach DIN 4084 nachzuweisen, wenn die o.g. Böschungswinkel überschritten werden, wenn die Böschungshöhe mehr als 5 m beträgt, wenn das Gelände mehr als $1 : 10$ (ca. 6°) geneigt ist, wenn Stapellasten $> 10 \text{ kN/m}^2$ neben dem Schutzstreifen liegen, wenn schwere Fahrzeuge näher als 3 m oder wenn normale Verkehrslasten näher als 1,5 m an der Böschungssoberkante fahren, wenn Auffüllungen unmittelbar neben dem Schutzstreifen liegen oder wenn vorhandene Leitungen und Anlagen gefährdet werden, bzw. äußere Einflüsse die Standsicherheit beeinträchtigen. Ergibt die Berechnung keine ausreichende Standsicherheit, muss die Böschung abgeflacht oder durch Verbaumaßnahmen gesichert werden. Bei Böschungshöhen ab 6 m sind Bermen von mindestens 1,5 m Breite zwischenzuschalten. Die so kurz wie möglich offen zu haltenden Baugrubenwände, auch Fels, sind mit einer wetterfesten Folie gegen Niederschläge und Austrocknung zu schützen. Gegebenenfalls sind weitere Sicherungsmaßnahmen der Baugrubenwände wie z.B. Bodenvernagelung oder Spritzbeton etc. vorzunehmen. Böschungsneigungen siehe Tab. 6 + 6a.

Baugrubenverbau (DIN EN 1610, DIN 4124)

Falls bei einem Baugrubenaushub keine normgerechten Böschungen, ggf. mit Stahlnägel und Spritzbeton, angelegt werden können, ist ein Baugrubenverbau erforderlich (siehe 4.4.2). Auch hier ist immer auf Wasserzutritt und gute Wasserableitung zu achten.

Die Wahl der Verbaumethode erfolgt u.a. unter Berücksichtigung folgender Angaben:

- Tiefe, Abmessungen, Grundstücksgrenzen
- Baugrund- und Grundwasserverhältnisse
- Abstand angrenzender Bauwerke, Leitungen etc.
- Belastungen und Erschütterungen innerhalb und außerhalb der Baugrube, Grenzbebauung
- Einheitskosten für Verbau und Erdaushub

4.4.2 Verbauarten

Einfacher Baugrubenverbau

Kleinere Baugruben über der Grundwasseroberfläche können mit einem waagrechten oder senkrechten Bohlenverbau und gegenseitiger Abstützung verbaut werden. Ab 7 bis 10 m Breite wird eine Doppel-T-Träger-Aussteifung erforderlich. Für schmale Leitungsgräben gibt es spezielle und transportable Grabenverbaugeräte.

Verankerte Elementwände

Bei Böden, die über eine bestimmte Höhe standfest sind, können die mit 60° bis 90° geneigten Baugrubenwände oder Böschungen mit fortschreitendem Ausbau abschnittsweise mit Baustahlmatten und mit Spritzbeton versiegelt werden. Darauf werden Wandelemente aus Stahlbeton zur Aufnahme des Erddrucks im Boden mit vorgespannten und verpressten Ankern rückverankert (Freispielanker, Litzenanker etc.).

Bodenvernagelung

60° bis 90° steile Böschungsflächen in Lockergesteine und in Fels können nach DIN EN 1537 durch die sogenannte Bodenvernagelung temporär oder dauerhaft gesichert werden. Hierbei wird die Böschung abschnittsweise mit geneigten und schlaffen (nicht vorgespannten) und geneigten Boden- oder Felsnägeln rückverhängt (z.B. GEWI-Stahlstäbe mit 20 – 30 mm Durchmesser in mortelverpresstem Bohrloch, ggf. mit Korrosionsschutz) und diese werden dann kraftschlüssig mit einer bewehrten Spritzbetonschale verbunden. Dabei wird die Zug- und Scherfestigkeit erhöht und die Bodenmasse bildet einen **bewehrten Verbundkörper**, der rechnerisch wie eine Schwergewichtsmauer behandelt wird (Abb. 18a, Bildtafel 9).

Spundwandverbau

Lose Böden oder Böden im Grundwasser müssen vor dem Ausschachten gegen Nachbrechen und Ausfließen mit Stahlspundwänden gesichert werden. Der Spundwandverbau ist nicht verformungsfrei, ist gering wasserdurchlässig und kann rückgebaut werden. Die Stahlbohlen werden durch Rammen, Rütteln oder Einpressen in den Boden eingebracht. Dabei sind Erschütterung und Auswirkungen auf Nachbargebäude zu beachten (Schäden durch Setzungen). Nichtbindige, rollige Böden sind leichter zu rammen als bindige. Bei halbfesten bindigen Böden und felsartigen Böden muss mit Einbringhilfen gearbeitet werden (Spüllanzen, Lockerungsbohrung, Vorspaltsprengung). Bis zu einer Baugrubentiefe von 3 bis 4 m können Spundwände über dem Grundwasser freistehend eingespannt werden (Einspanntiefe 1,0 - 1,3 x h). Bei ausgesteiften oder rückverankerten Spundwänden beträgt die Einspanntiefe 0,1 - 0,3 x h. Die nötige Rammtiefe richtet sich auch nach der Standfestigkeit der Baugrubensohle gegen hydraulischen Grundbruch.

Trägerbohlenverbau

Bei Baugruben bis 25 m Tiefe, oder bei nicht standfesten Böden oberhalb des Grundwassers kann ein Trägerbohlenverbau ausgeführt werden. Der Trägerbohlenverbau ist nachgiebig, ist nicht wasserdicht und kann rückgebaut werden. Im Abstand von 1,5 - 3 m werden Stahlträger in den Boden gerammt oder in gebohrte Löcher gesetzt. Hinter den Trägern werden im Zuge des Baugrubenaushubs abschnittsweise (0,5 – 1,25 m) Holzbohlen kraftschlüssig mit dem Boden eingesetzt und verkeilt und bei bindigen, standfesten Böden mit Spritzbeton oder Betonfertigteile ausgefacht. Die Absicherung bei Tiefen ab 2 - 3 m erfolgt über eine vorgespannte Rückverankerung (Verpress- oder Injektionsanker) in den Boden oder über eine Aussteifung in den Innenraum (Berliner Verbau). Die Einbindetiefe der Träger richtet sich nach den statischen Erfordernissen und beträgt im Allgemeinen 1,5 - 3 m. Beim Verfüllen der Baugrube werden die Bohlen nacheinander entfernt oder belassen. Temporäre Anker werden entspannt, gezogen oder verbleiben im Boden und entspannen sich mit der Zeit selbst (Litzenanker). Permanente Anker müssen besonders korrosionssgeschützt werden und viele Jahrzehnte halten. Der Arbeitsraum wird abschnittsweise verfüllt, z.B. mit Magerbeton oder mit sandigem Kies und ggf. statisch oder dynamisch verdichtet. Die Träger werden anschließend gezogen, oder falls einbetoniert, unten abgetrennt. Beim **Essener Verbau** werden Böschungen mit $\beta = 45^\circ$ bis 60° mit Stahlträger, Baustahlmatten, Maschendraht, Spritzbeton und Erdnägeln gesichert.

Bohrpfahlwand

Bohrpfahlwände zählen zu den **massiven und verformungssarmen** Verbauarten, die bevorzugt zur Sicherung von Baugruben neben bestehenden Bauwerken eingesetzt werden. Eine Bohrpahlwand kann nicht rückgebaut werden, aber als konstruktiver Teil des Bauwerks verwendet werden und ist bei überschnitterner Bauweise gering wasserdurchlässig. Die Wände bestehen aus aufgelösten, tangierenden oder überschnittenen Großbohrpfählen aus Beton mit einer Stahlbewehrung und mit Durchmessern von 0,3 bis über 2 m (Überschneidung im Taktverfahren 1-3-5 2-4..., Überschnitt 5 bis 10 cm). Mit diesem aufwändigen und teuren, aber auch bei schwierigen Verhältnissen sehr sicheren Verfahren können Wandtiefen von etwa 30 - 40 m erreicht werden. Über dem Grundwasser können die Pfähle tangierend oder aufgelöst im Abstand von ca. 1 bis 2 m angeordnet werden. Die Zwischenräume bleiben frei oder werden bei lockerem Boden mit Spritzbeton oder Holzbohlen gesichert (Streckträgerverbau). Je nach Erfordernis werden Bohrpahlwände mit vorgespannten Verpressankern rückverankert (Bildtafel 5 und 9). Der ausgehobene Boden muss entsorgt werden. Eine Bohrpahlwand kann auch unmittelbar an eine Nachbarwand oder schräg unter bestehende Fundamente gesetzt werden.

Schlitzwände, Dichtwände, Schmalwände, Dichtungssohle

Diese zählen ebenfalls zu den **massiven, verformungssarmen und nahezu wasserdichten** Verbauarten mit ggf. konstruktiver Funktion. Die 0,6 bis 1,2 m breiten Schlitzwände werden entweder gefräst oder mit einem 2 bis 3 m breiten Greifer nacheinander zwischen den betonierte Leitwänden, meist nach dem 2-Phasenverfahren hergestellt (Bentonitstützflüssigkeit,

Stahlbewehrung, Beton). Die üblichen Tiefen betragen 30 bis 40 m oder sogar bis zu 100 m. Ist eine möglichst dichte Baugrubenumschließung gefordert, oder müssen schadstoffbeladene Deponien oder Industriestandorte gegen die Umgebung abgedichtet werden, können Schlitzwände als sogenannte Dichtwände im 1-Phasenverfahren (Bentonit-Zement-Suspension) angewendet werden. In Lockergesteinen kann bei beiden alternativ auch das Hochdruck-Düsenstrahlwandverfahren angewendet werden (Bodenvermörtelung). Beim Bau der ca. 5 bis 10 cm dicken **Schmalwänden** werden spezielle Spundbohlen oder ein Tiefenrüttler in den Untergrund eingerammt oder eingerüttelt und beim Ziehen der Bohlen der entstehende Hohlraum sofort mit einer Abdichtungssuspension verfüllt. Durch Aneinanderreihung entsteht eine schmale und durchgehende Dichtungswand. Bei einer sehr tiefliegenden und wasserundurchlässigen Schicht, die durch die Dichtwand nicht erreicht wird, und wo eine tiefe Grundwasserabsenkung nicht möglich ist, muss die Kellersohle durch eine betonierte **Dichtungssohle** abgedichtet werden. Dass erfolgt durch Unterwasserbeton oder durch Hochdruckinjektion.

Bodenverfestigung

Verfahren der Bodenverfestigung werden besonders bei Unterfangungsarbeiten in Locker- und Festgestein angewendet. Die Verfestigung erfolgt durch Einpressen von hydraulischen Bindemitteln, chemischen Lösungen oder Zement, Baukalk, Kalk-Zement-Gemisch, Polymere in die Poren und Klüften, durch Geogitter oder durch eine Vereisung des Bodens. Dadurch kann die Festigkeit des Bodens erhöht und die Wasserwegsamkeit verringert werden. Im herkömmlichen Sinne nicht injizierbare feinkörnige Böden von weicher oder steifer Konsistenz und organische Böden können mit dem Soil-Fracturing-Verfahren stabilisiert werden.

Nach starken Niederschlägen dürfen Baugruben in wasserempfindlichen Bodenarten und nahe der Grundwasseroberfläche nicht befahren werden. Die Fundamentsohlen müssen gesäubert und mit Unterbeton (B15) versiegelt werden. Bei schluffig-tonigen Schichten sind ggf. Grobschotterlagen und Baggermatratzen zu verwenden.

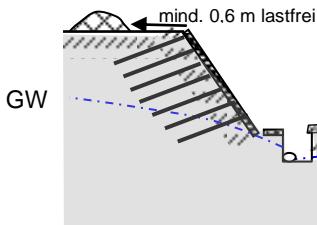
Böschungssicherung, Baugrube (Beispiel)

- Eine Baugrube ist ab > 1,25 m Tiefe zu böschen oder zu verbauen.
- Am Böschungsrand mind. 0,6 m breiter, lastfreier Streifen. Bis 12 t Belastung mind. 1 m, ab 12 to - 40 to mind. 2 m.
- Tiefe bis maximal 5 m. Böschungswinkel: nichtbindig oder weich bis 45°, steif – halbfest bis 60°, Fels bis 80°, Auffüllung bis 35°.
- Böschung so kurz wie möglich offen lassen und mit wetterfester Plastikplane oder Spritzbeton vor Austrocknung sichern.
- Ab > 5 m Böschungshöhe etc. - Sicherheitsberechnung.
- Ab > 6 m Böschungshöhe - Bermen von 1,5 m Breite anlegen.
- Ab > 60° Böschung Spritzbeton, ggf. Bodenvernagelung.
- Sicherung der Sohle mit 0,4 m Kies auf Geotextil, Gefälle zum Pumpensumpf. Wasserzutritt und Ableitung beachten.
- Ggf. Wasserhaltung über Pumpensumpf (Setzungsgefahr!).
- GW-Spiegel unter Fundamentsohle bei nichtbindigem Boden = Fundamentbreite, - bei bindigem Boden = 2 x Fundamentbreite.
- Sofort nach Fundamentaushub Beton einbringen.
- Für die Befahrung der Baugrube 0,2 - 0,3 m Grobschotter einbauen.

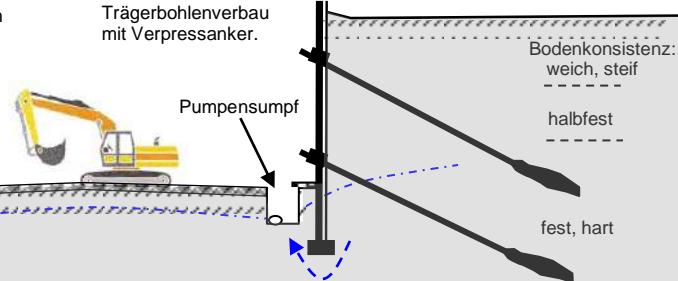
Rückverankerter Trägerbohlenverbau (Beispiel)

- Wasserdurchlässiger Verbau. GW-Absenkung durch Pumpen.
- Stahlträger mit Einbindtiefe = $\frac{1}{2}$ h, im Fels mind. 0,5 m.
- Verbauträgerabstand 1,5 – 2 m mit Holzaufschaltung, ggf. mit Spritzbeton oder Betonfertigteile.
- Arbeitsraum 0,6 m.
- Rückverankerung mit nachverpressbaren Ankern in mindestens steifem bis halbfestem Boden.
- Ankerabstand > 1,5 m, gestaffelte Anordnung.
- Ankerlänge > 5 m.
- Abstand Anker – Bebauung: > 3 m.
- Ankerwinkel beachten.
- Vertikalkräfte auf die Stahlträger beachten
- Versorgungsleitungen etc. beachten.
- Ggf. Beweissicherung durchführen.
- Bei Nähe zur Bebauung ggf. Bohrpfahlwand einbauen!

Böschungssicherung z.B. mit Stahlnägeln und bewehrtem Spritzbeton oder mit Elementwänden.



Trägerbohlenverbau mit Verpressanker.



Temporäre Grundwasserabsenkung und kostenpflichtige Ableitung über Pumpensumpfe und Schwebstoffabscheider in die Kanalisation über die Bauzeit. Bei Schadstoffen Abreinigung, z.B. über Aktivkohlefilter. Mögliche Setzungen durch die Verringerung des Auftriebs im Boden beachten. Setzung benachbarter Gebäude in setzungsempfindlichen Schichten beachten! Absenkungstrichter berechnen und überwachen. Die Genauigkeit der Berechnung von Wasserhaltungsmaßnahmen hat Grenzen. Daher ständige Überwachung und Beweissicherung. Möglichen hydraulischen Grundbruch beachten.

Die Träger ggf. einbetonieren. Bei der Einbindtiefe der Träger oder einer Dichtwand in das Grundwasser ist die Frage eines hydraulischen Grundbruchs zu beachten! Die Spannung der Anker wird während der Verfüllung der Arbeitsräume i.d.R. gelöst.

Abb. 18a: Baugrubensicherung, offene Grundwasserhaltung (schematische Beispiele ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Ist eine Grundwasserabsenkung nicht möglich oder nicht wirtschaftlich, muss eine dichte Baugrube hergestellt werden. Hier kommen Spundwände, überschnittene Bohrpfahlwände, Schlitzwände und Mixed-in-Place-Wände etc. bis in eine tieferliegende und gering wasserundurchlässige Schicht infrage. Falls nicht vorhanden, muss der Bodenkörper mit Spezialverfahren, wie z.B. mit einer dichten Sohle oder mit unter Wasser betonierter Sohle, wasserundurchlässig gemacht werden. Zur Auftriebsicherung ggf. Zuganker einbauen. Erforderliche Genehmigungen beachten.

4.5 Baugrund und Grundwasser, Frost- und Schrumpfsicherheit

(DIN 4095, DIN 18195 – 2017, DIN 18532, 18533, 18534, 18535, DIN 1045-1, DAfStb-Richtlinie wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton – kurz WU-Richtlinie, Neufassung 12/2017 und Heft 555 des Dt. Ausschusses für Stahlbeton)

4.5.1 Bauen im Grundwasser, Wassereinwirkungsklassen etc.

Das Grundwasser ist zu schützen und möglichst wenig zu beeinträchtigen. Weil bindige Lockergesteine im Grundwasser oft ein ungünstiger Baugrund sind wurden in früheren Zeiten unterkellerte Bauwerke so geplant und gebaut, dass auch ein niederschlagsbedingter oder dauerhafter hoher Grundwasserstand das Kellergeschoss nicht, oder nur kurzzeitig erreicht hat (Bauplatzauswahl, Kellertiefe, Drainagen). Falls Bauen im Grundwasser unumgänglich war, hat man durch großflächige Drainagemaßnahmen oder durch ständiges Abpumpen den Grundwasserstand dauerhaft abgesenkt. Beim heutigen Bauplatz mangel werden Bauwerke oft in Tal- und Flussauen gebaut, wo das Grundwasser ständig oder temporär nahe an der Bodenoberfläche steht. Viele Bauwerke werden heute auch tiefer gegründet (Tiefgarage etc.) und erreichen dann den Grundwasserhorizont. Wasser- und Feuchtigkeitseinwirkungen auf erdberührte Bauteile und auf Untergeschossräume entstehen durch Bodenfeuchte, versickerndes Oberflächenwasser und durch stauendes und drückendes Sicker-, Schicht- und Grundwasser. **Es gilt: stauen-des Wasser = drückendes Wasser.** Bei Bauwerken im Boden sind auf jeden Fall Abdichtungsmaßnahmen mindestens gegen Bodenfeuchte bis hin zu massiven Abdichtungen gegen drückendes Wasser und gegen Auftrieb nach DIN anzuwenden. Je nach dem Grundwasserhöchststand (c), der Wasserdurchlässigkeit und der Wassereinwirkungsklasse nach DIN 18533 muss das Untergeschoß eines Bauwerks druckwasserdicht und auftriebsicher gebaut werden. Eine dauerhafte Ableitung von Grundwasser über Drainagen in die Kanalisation, in einen Vorfluter oder eine direkte Versickerung in tiefere Felsschichten ist heute nicht mehr zulässig. Bei der Unterkellerung von Gebäuden ist die Einwirkung von Sicker-, Schicht- und Grundwasser oder der Eintritt und Aufstieg von Bodenfeuchtigkeit in das Bauwerk zu unterbinden. Bei Wohnkellern oder bei einer hochwertigen Gewerbenutzung ist jede Feuchtigkeit über die Wände und aus dem Boden in die UG-Räume zu vermeiden. Eine wasserdichte Weiße Wanne ohne eine Zusatzabdichtung kann hier Restfeuchte durchlassen. Daher ist auf eine ausreichende Belüftung zu achten. Lehmige, mergelige und tonige (bindige) Böden sind schwach bis sehr schwach wasserundurchlässig. Regenwasser versickert hier langsam und kann sich in diesen Böden und in den Arbeitsräumen entlang der Kellerwände drückend anstauen. Hier ist auch bei einem dauerhaften Grundwasserstand unterhalb der Bodenplatte eine sehr gute und haltbare Abdichtung erforderlich, weil es bei Starkregenfällen zum temporären und drückenden Aufstau in die verfüllten Arbeitsräume kommen kann. Nicht erlaubt ist eine Dränung bei permanent drückendem Grund- und Schichtwasser oberhalb der Kellersohle, weil dieses nicht dauerhaft abgeleitet und abgesenkt werden darf. Hier muss eine Abdichtung mit einer Schwarzen, Weißen, Gelben oder Brauner Wanne mit einer geeigneten Kellerlüftung hergestellt werden. Den Auftrieb und die Abdichtung der Lichtschächte beachten! Eine Weiße Wanne hält länger dicht, ist besser zu reparieren und i.d.R. wirtschaftlicher, als eine Schwarze Wanne. Ergänzend zu einer Beton- oder Kunststoffabdichtung von Wänden und Kellerböden kann in bestimmten Fällen bei temporär drückendem Sickerwasser (nicht Grundwasser!) zur Sicherheit eine frostfreie Dränung mit einem geeigneten Gefälle sinnvoll sein. Diese nur temporär wirksame und kostenpflichtige Dränung muss, falls eine Versickerung des Drainwassers über einen Retentions- und Sickerschacht im schwach durchlässigen Boden nicht ausreicht, mit Genehmigung der Wasserbehörde rückstausicher an die Kanalisation angeschlossen werden. Eine Dränung ersetzt aber keine fachgerechte und angepasste Abdichtung von Kellerböden und Wänden! In manchen Fällen muss auch eine horizontale Grundwasserumläufigkeit um das Bauwerk herum hergestellt werden, damit es nicht zu einem Grundwasseraufstau durch das Gebäude-UG kommt und die Nachbarbauwerke beeinträchtigt werden. Dann sind zusätzlich zur Abdichtung horizontale Drainagen zur Umläufigkeit einzubauen, die natürlich nicht an die Kanalisation angeschlossen werden dürfen. Es gibt mehrere Möglichkeiten Bodenfeuchte und drückendes Wasser dauerhaft von Bauteilen und vom Inneren eines Untergeschosses fernzuhalten.

Beispiele:

- ...eine **Schwarze Wanne**, bei der das UG je nach den Erfordernissen z.B. mit einer Bitumendickbeschichtung (PMBC) und bei hoher Wassereinwirkung mit Polymerbitumenbahnen oder mit Kunststoff- oder Elastomerbahnen (K-Wanne) nach den Regeln der Technik abgedichtet wird. Fachgerecht ausgeführte Schwarze Wannen sind relativ günstig, einige Jahrzehnte wasser- und diffusionsdicht, aber schwierig zu reparieren.
- ...eine **Weiße (WU) Wanne** aus gering wasserundurchlässigem Beton mit hohem Wassereindringungswiderstand und mit rissweitenbeschränkender Bewehrung (WU-Beton, DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08, WU-Richtlinie 2017, Heft 555 des Dt. Ausschusses für Stahlbeton etc.). Weiße Wannen sind i.d.R. viele Jahrzehnte wasserdicht, relativ gut zu reparieren, aber nur mit größerem Aufwand diffusionsdicht, z.B. kombiniert mit einer **Gelben Wanne** mit einer Frischbeton-Verbundfolie an der Außenseite.
- ...eine **Kombination aus Schwarzer und Weißer Wanne**, die, ebenso wie die Gelbe Wanne, sehr lange sehr dicht und für hochwertige Wohnkeller etc. geeignet ist.
- ...eine **Mischbauweise: Boden weiß, Wand schwarz**. Übergangsbereiche sorgfältig ausführen (Beton brüsten, strahlen).
- ...eine **Braune Wanne** ist eine Außenabdichtung der WU-Betonwanne mit bentonitbasierten Dichtungsbahnen zwischen Geotextillagen. Braune Wannen sind nicht Diffusionsdicht, aber lange haltbar und gegen Schäden weniger empfindlich (Selbstheilung).
- Falls erforderlich kann zusätzlich eine temporäre **Sicherheitsdrainage** oberhalb der Abdichtung mit Notüberlauf am festzulegenden **Bemessungswasserstand** wegen sehr selten aber dann über die Bodenplatte bzw. über die Abdichtung ansteigendem Grundwasser und/oder mit einem wirksamen Retentions- und Versickerungssystem, oder für Stauwasser von der Oberfläche genehmigt werden.
- Der **Bemessungswasserstand** ist der höchste zu erwartende Grundwasserstand mit Sicherheitszuschlag, für den das Bauwerk bemessen wird und wird von der Wasserbehörde festgelegt. Alle Bauteile unterhalb des Bemessungswasserstands sind wasserdicht und auftriebsicher herzustellen und auch auf Wasserdruck zu bemessen. Die temporäre Dränung ist kostenpflichtig und ggf. gereinigt in die Kanalisation einzuleiten.
- Eine **dauerhafte und flächige Grundwasserabsenkung durch eine Drainage** in die Kanalisation, in einen Vorfluter oder in tiefer Felsschichten wird heute zum Schutz des Grundwassers und der Nachbarbauwerke nicht mehr genehmigt.
- Bei der Planung der Abdichtung und der Auftriebs sicherheit von Untergeschossen ist eine Fachberatung unabdingbar!

Neue Abdichtungsnormen DIN 18531 - 18535

Für die unterschiedlichen Grund- und Sickerwasserzustände im Boden waren früher in der DIN 18195 "Lastfälle" definiert. Seit Juli 2017 gelten die "Wassereinwirkungsklassen" der neuen Abdichtungsnormen DIN 18531 - 18535 für die Abdichtung von Dächern und Balkonen etc., Verkehrsflächen aus Beton, erdberührter Bauteile, Innenräumen und Behälter und Becken. Die nun neugefasste DIN 18195-2017 geht darin auf und erklärt nur noch Begrifflichkeiten. Die DIN 18533-1 bis 3: 2017-07 gilt für die "Abdichtung von erdberührten Bauteilen" mit bahnförmigen und mit flüssig zu verarbeitenden Abdichtungsstoffen (Schwarze Wanne). Relevant für die Beurteilung nach der neuen Norm ist nicht mehr die Entstehungsart des Wassers und dessen Einwirkungsdauer, sondern die Einwirkungsart und Einwirkungsintensität auf das jeweilige Bauteil. Diese werden anhand von **Wassereinwirkungsklassen - W1-E bis W4-E** - definiert. Zur Auswahl der Abdichtungsbauart muss der Planer außerdem die planmäßige Rissaufweitung vorhandener Risse oder die zu erwartende Neurissbildung kennen. Dazu wurden vier **Rissklassen - R1-E bis R4-E** - definiert, denen **Rissüberbrückungsklassen - RÜ1-E bis RÜ4-E** - der Abdichtungsstoffe zugeordnet sind. Außerdem wurden **Raumnutzungsklassen - RN1-E bis RN3-E** - und **Zuverlässigkeitserforderungen** neue definiert. Für den Feuchteschutz der erdberührten Bauteile gilt: **Stauendes Wasser = drückendes Wasser**. Auch die möglicherweise notwendige Dichtigkeit der Bodenplatte bei wenig durchlässigem Boden ist zu beachten. Die Sickerwassermenge entlang eines Bauwerks ist durch eine geeignete Oberflächenabdichtung so gering wie möglich halten.

Nr.	1	2	3	4	
	Klasse	Art der Einwirkung	Beschreibung	Abdichtung nach	
1	W1-E	Bodenfeuchte und nichtdrückendes Wasser	5.1.	8.5	Lastfall 4 alte DIN 18195
2	W1.1-E	Bodenfeuchte und nicht drückendes Wasser bei Bodenplatten und erdberührten Wänden	5.1.	8.5.1	
3	W1.2-E	Bodenfeuchte und nichtdrückendes Wasser bei Bodenplatten und erdberührten Wänden mit Dränung	5.1.	8.5.1	
4	W2-E	Drückendes Wasser	5.1.	8.6	Lastfall 6 alte DIN 18195
5	W2.1-E	Mäßige Einwirkung von drückendem Wasser ≤ 3 m Eintauchtiefe	5.1.	8.6.1	
6	W2.2-E	Hohe Einwirkung von drückendem Wasser > 3 m Eintauchtiefe	5.1.	8.6.2	
7	W3-E	Nicht drückendes Wasser auf erdüberströmten Decken	5.1.	8.7	
8	W4-E	Spritzwasser und Bodenfeuchte am Wandsockel sowie Kapillarwasser in und unter Wänden	5.1.	8.8	

Abb. 19: Wassereinwirkungsklassen nach DIN 18533-1 bis 3: 2017-07

Quellen: DIN 18533-1.

Klasse	Anforderung durch die Raumnutzung	Beispiele
RN1-E	geringe Anforderung an die Trockenheit der Raumluft	offene Werk- oder Lagerhalle; Tiefgarage
RN2-E	übliche Anforderung an die Trockenheit der Raumluft und übliche Anforderung an die Zuverlässigkeit der Abdichtungsbauart	Aufenthaltsräume; Lagerräume für feuchtempfindliche Güter oder in Wohn-/Bürogebäuden
RN3-E	hohe Anforderung an die Trockenheit der Raumluft und hohe Anforderung an die Zuverlässigkeit der Abdichtungsbauart	Magazin zur Lagerung unersetzlicher Kulturgüter; Raum für den Zentralrechner

Abb. 19-1: Raumnutzungsklassen nach DIN 18533-1

Quelle: DIN 18533

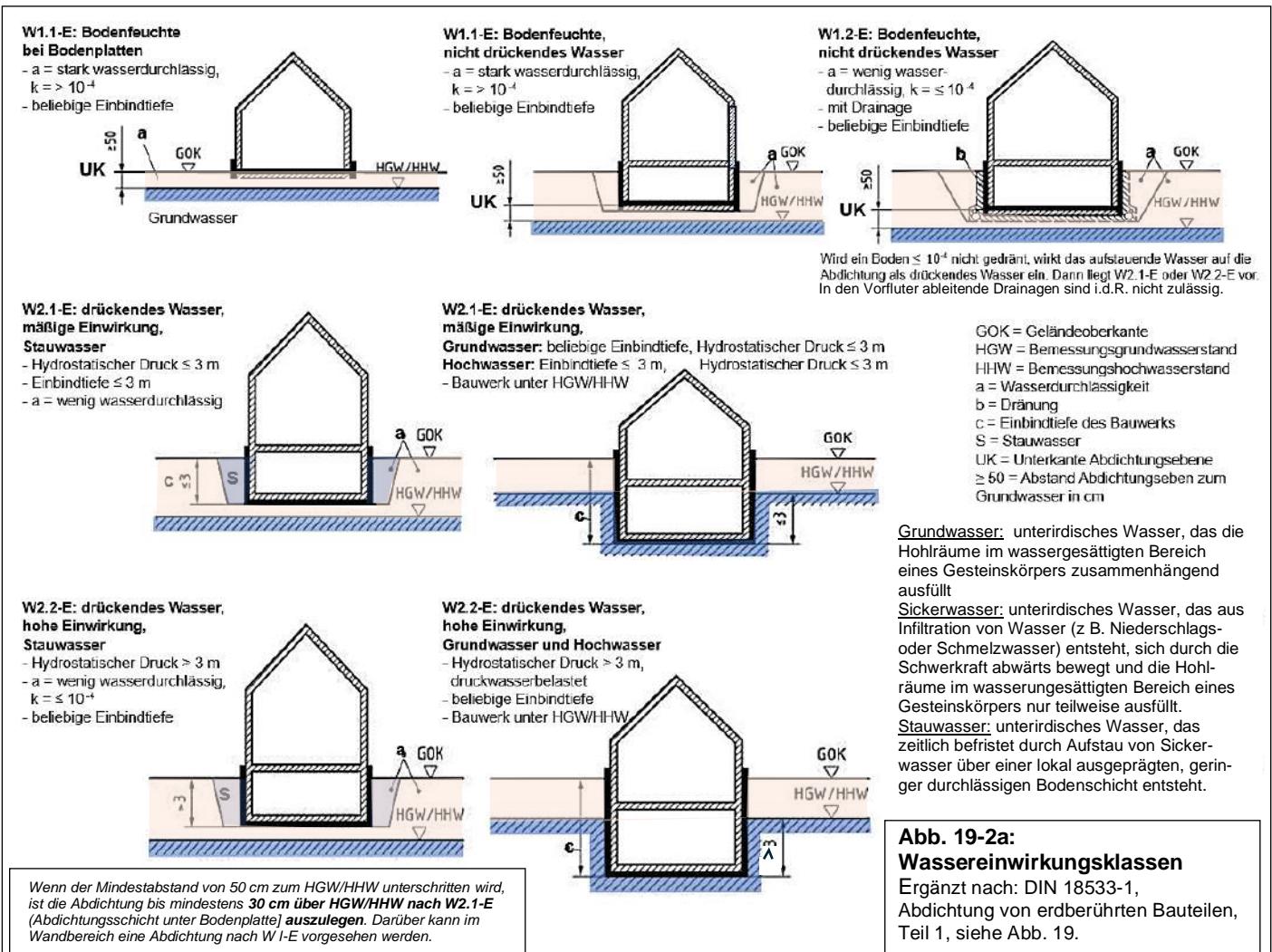
Durchlässigkeitsbeiwert kf in m/s	Durchlässigkeitsbereich nach DIN	Bodenart
$> 10^{-2}$	sehr stark durchlässig	Grobkies, Geröll
10^{-2} bis 10^{-4}	stark durchlässig Feinkies	Feinkies, Grobsand
10^{-4} bis 10^{-6}	durchlässig	Feinsand, Sand lehmig oder schluffig
10^{-6} bis 10^{-8}	schwach durchlässig	Löß, Schluff
$< 10^{-8}$	sehr schwach durchlässig	Lehm, schluffiger Lehm, Ton

Wichtig!

"Die Gebäude-Versicherer wollen zukünftig Feuchteschäden durch Sicker- oder Grundwasser nur noch zu versichern, wenn die PMBC-Abdichtung (polymermodifizierten Bitumendickbeschichtungen) von einem PMBC-Fachbetrieb / PMBC-Fachverarbeiter mit einem dafür zugelassenen Material hergestellt wurde. Es ist daher ratsam, vorab die genauen Bedingungen der eigenen Gebäudeversicherung zu prüfen."

Abb. 19-2: Durchlässigkeitsbereiche Quelle: DIN 18130

- Sehr schwach durchlässig, z.B. Ton, Tonsteine, unausgelaugter Gipskeuper.
- Schwach durchlässig, z.B. Lehm, Lösslehm.
- Kluftgrundwasserleiter haben oft $k_f 10^{-5} - 10^{-7}$ m/s.
- Karstgrundwasserleiter sind schwierig abzuschätzen und werden mit durchschnittlich 10^{-4} m/s mit Schwankungen von $10^{-2} - 10^{-8}$ m/s angegeben. Hier ist auch eine Verlehmung der Karsthohlräume möglich.



Für die Untergeschoss-Abdichtung mit einer Weißen Wanne gibt es in den WU-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton DAfStb zwei Wassereinwirkungsbeanspruchungsklassen und nach DBV zwei Nutzungsklassen:

Beanspruchungsklasse	Wassereinwirkung nach WU-Richtlinie „alt“	Wassereinwirkung nach WU-Richtlinie „neu“
1	<ul style="list-style-type: none"> ■ drückendes Wasser ■ nichtdrückendes Wasser ■ zeitweise aufstauendes Sickerwasser 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ständig oder zeitweise drückendes Wasser ■ WU-Dächer
2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bodenfeuchte ■ nichtstaunendes Sickerwasser 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bodenfeuchte ■ an der Wand ablaufendes Wasser

↑ Tabelle 1: Vergleich der Einstufung der Wassereinwirkung nach alter und neuer WU-Richtlinie

Abb. 19-3:
Wassereinwirkungsklassen nach WU-Richtlinie.
Quelle: Newsletter Technik, Engineering & Innovation 2018, Heidelberger Zement.

DBV-Merkblatt "Hochwertige Nutzung" Nutzungsklasse A

Unterklasse	Raumnutzung	Raumklima	Beispiele (informativ)	Maßnahmen
A***	anspruchs-voll	warm, sehr geringe Luftfeuchte, geringe Toleranz der Klimadaten	Archiv, Bibliotheken, Technikräume mit feuchteempfindlichen Geräten (Labor, Server usw.), Lager für stark Feuchte- oder temperaturempfindliche Güter	Wärmedämmung (EnEV), Heizung, Zwangslüftung, Klimaanlage (Luftentfeuchtung)
A**	normal	Warm, geringe Luftfeuchte, mäßige Toleranz der Klimadaten	Räume für dauerhaften Aufenthalt von Menschen, wie Versammlungs-, Büro-, Wohn-, Aufenthalts- oder Umkleideräume, Verkaufsstätten, Lager für feuchte-empfindliche Güter, Technikzentralen	Wärmedämmung (EnEV), Heizung, Zwangslüftung, ggf. Klimaanlage
A*	einfach	Warm bis kühl, normale Luftfeuchte, große Toleranz der Klimadaten	Räume für zeitweiligen Aufenthalt von wenigen Menschen, ausgebauter Keller, wie Hobbyräume, Werkstätten, Waschküche im Einfamilienhaus, Wäschetrockenraum, Abstellräume	Wärmedämmung (EnEV), ggf. ohne Heizung, natürliche Lüftung (Fenster, Lüftschächte, ggf. nutzerunabhängig)
A⁰	untergeordnet	Keine Anforderungen	Einfache Technikräume, z.B. Hausanschlussraum	-

DAfStb - Neuauflage WU-Richtlinie | Prof. Claus Flohrer | claus@flohrer.de | Sept. 2017

Abb. 19-3a:
Hochwertige Nutzung, Nutzungsklasse A nach DBV (Dt. Beton- und Bautechnik- Verein).

Nutzungsklasse A: Bei Bauwerken oder Bauteilen der Nutzungsklasse A sind Feuchtstellen auf der luftseitigen Bauteilloberfläche als Folge von Wasserdurchtritt nicht zulässig. Ggf. sind zusätzliche bauphysikalische und raumklimatische Maßnahmen erforderlich.

Nutzungsklasse B: Bei Bauwerken oder Bauteilen der Nutzungsklasse B sind Feuchtstellen auf der luftseitigen Bauteilloberfläche als Folge von Wasserdurchtritt zulässig (feuchtebedingte Dunkelfärbungen, gegebenenfalls auch die Bildung von Wasserperlen, aber kein Wasserdurchtritt, der zum Ablaufen oder Abtropfen von Wassertropfen oder zu Pfützen führt). Abweichenden Forderungen im Bauvertrag festlegen.

Quelle: Prof. C. Flohrer, 5. DAfStb-Jahrestagung 20./21.09.2017 TU Kaiserslautern.

Zuständigkeiten und Aufgaben	Festlegung der Nutzungsanforderungen, Definition Raumklima einheitl. zulässige Grenzwerte	Bauaufsichtsräte
1 Festlegung der Abdichtungsart	V	TGA-Führer
2 Festlegung der Abdichtungssatz	V	Tragsicherkeitsprüfer
3 Vorbereiten zu festerer Urneutbeurteilung	V	OPFORPRAKTEUR
4 Energie-/Nachweis, Bemessung Wärmedämmung, Nachweis Tüvastor und Wärmebrücken	V	Bauphysiker
5 Angabe von Beanspruchungsklasse und Wassersatz	V	Bauphysiker
6 Baumessungswasserstand	V	Baugrubenabgängeträger
7 Angabe chemische Zusammensetzung des anstehenden Wassers	V	
8 Feststellung Bauteileinwirkungen	V	
9 Prognose Rissentwicklung während der Nutzung	V	
10 Entwurfsgrundriss gem. WURichtung (evtl. differenziert nach Bauteilen)	V	
11 Ausbildung des Bauherren über Konsequenzen aus Entwurfsgrundriss	V	
12 Rückverteilung bischließlich Entwurfsgrundsatz	V	
13 Planung aus dem Entwurfsgrundsatz erforderlich wertender Reservfußboden gemäß R11 Abschnitt 7(5).	V	
14 Planung Zugangspunkte für Abdichtungsarbeiten während der Nutzung	V	
15 Planung verdecklicher Oberflächenschwundäge / Beschichtungen	N	
16 Planung und Konstruktion von Dach- / Anbauts- / Schinstieg	N	
17 Planung Horizont- Klima- Lüftungsanlagen	N	
18 Mindestfestigkeitsklasse Beton	V	
19 Rechnerwert Betonzugfestigkeit des jungen Betons	V	
20 Betonarbeitszeitbegrenzung	M	
21 Planung und Durchführung der Nachbehandlung	V	
22 Festlegung von Füllgut und Verfahren zur Ablösung wasserführender Risse oder Fehlstellen	M	
23 Planung Zählpunkte Anstreben Wasseraufhaltung und Zeitpunkt der Dichtheitsprüfung	M	
V - Verpflichtung (zentral) / Verpflichtung zur Errichtung der Maßnahmen und Bezeichnung der Informationen N - Maßnahmen	M	

Abb. 19-4:
Checkliste
Zuständigkeiten und Aufgaben.

Quelle: BVB-Merkblatt „Hochwertige Nutzung von Untergeschossen - Bauphysik und Raumklima“, Bundesverband Boden e.V., Essen.

4.5.1.1 Abdichtung, Grundwasserumläufigkeit, Wasserhaltung

Die Planung und Einrichtung von Untergeschoß-Abdichtungen und von Umlaufdrainagen erfordern ein hohes Maß an Erfahrung. Je nach der Grundwasser- und Bodensituation (DIN 18533) muss eine geeignete **Abdichtung der Bodenplatte und der Untergeschoß-Außenwände** z.B. durch eine Schwarze/Weiße/Gelbe/Braune Wanne bis zum höchsten zu erwartenden Grundwasserstand mit Sicherheitszuschlag (Bemessungswasserstand) eingebaut werden. Auch die **Auftriebssicherheit** des Bauwerks über die Bau- und Standzeit ist zu gewährleisten. Das Grundwasser darf nur kurzzeitig und in geringstmöglichen Mengen während der Bauzeit des Untergeschosses abgesenkt werden und es sind die Auswirkungen des **Absenkungstrichter** auf umgebende Bauwerke (Setzungen), Brunnen und Gewässer zu beachten. Im Absenkungsbereich kommt es zu einer Verminderung des Auftriebs des Bodens, das Raumgewicht erhöht sich und je nach Bodenart kann es zu erheblichen Setzungen kommen. Eine Wasserhaltung bewirkt auch immer eine Versteilung der Grundwasserfläche und eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit und der Auslaugung. Bei Bauplanungen ist die allseitige Wasserbeanspruchung von der Erdseite zu berücksichtigen. Zur Minimierung des Sickerwasserzutritts kann der lagenweise verdichtete Arbeitsraum an der Oberfläche um das Gebäude herum gering wasserdurchlässig abgedichtet werden. Über die Standzeit des Bauwerks muss ggf. eine **Grundwasserumläufigkeit** hergestellt werden. Damit soll verhindert werden, dass es durch das Untergeschoßes des Bauwerks zu einem Grundwasseraufstau kommt und Nachbarbauwerke z.B. durch Feuchtigkeit oder Wasserzutritt geschädigt werden. Um Bauschäden bei flach stehendem und bei drückendem Grund- und Sickerwasser zu vermeiden und um die Nutzung und Tiefe der Untergeschosse ungeachtet der Grundwasserverhältnisse frei wählen zu können, z.B. Nutzungsklasse RN 2-E, müssen entsprechende bautechnische Vorkehrungen getroffen werden. Zweckmäßig ist die Erhebung von langjährigen Grundwasserdaten, z.B. durch Einsicht in regionale Baugrundkarten, geologische Karten und durch Befragung der örtlichen Fachleute bei Landratsamt und Stadtverwaltung. Falls ein Geotechnischer Bericht erstellt wird, was bei GK 2 und 3 (Grundwasserkontakt etc.) dringend zu empfehlen ist, müssen auch die Grundwasserverhältnisse mit erkundet und beschrieben werden. Eine dauerhafte oder temporäre Ableitung und Absenkung von Grund- Schicht- und Sickerwasser und von Regensickerwasser aus dem Untergrund über Drainagen/Pumpe/ Überlauf etc. in die Abwasserkanalisation, in tiefere Grundwasserstockwerke oder in den Vorfluter ist während der Standzeit eines Bauwerks aus Grundwasserschutzgründen nicht zulässig. Nur in begründeten Ausnahmefällen kann eine Genehmigung für eine temporäre und kostenpflichtige Einleitung in die Kanalisation durch die Stadt Ludwigsburg und durch das Landratsamt Ludwigsburg erteilt werden. Dann wird vom Landratsamt ein **Bemessungsgrundwasserstand** festgelegt und es muss ein rückstausicherer Notüberlauf in die Kanalisation ggf. mit Pumpe eingerichtet werden. Der wasserdichte Bau eines Untergeschosses, die auftriebsichere Erstellung eines Bauwerks und der Einbau einer Grundwasserumläufigkeit sind zumutbar. Es muss so geplant und gebaut werden, dass das natürlich anstehende Grund- und Sickerwasser nicht beeinträchtigt wird und die Dichtheit, Stabilität und Nutzung des Bauwerks und der Nachbarbauwerke dauerhaft sichergestellt sind. Schädliche Einflüsse eines Bauwerks auf Nachbarbauwerke und Nachbargrundstücke müssen vermieden werden. Alle Baugrundkundungsmaßnahmen und Baumaßnahmen, die in das Grundwasser eingreifen, oder Auswirkungen auf das Grundwasser haben, sind vor Baubeginn von den zuständigen Fachbehörden zu genehmigen. Eine mögliche **Versickerung von Dachflächen- und Hofflächenwasser** muss über eine belebte Bodenzone, z.B. in Mulden mit kf 1×10^{-3} bis 1×10^{-6} (Arbeitsblatt DWA-A 138 - Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.) erfolgen. Bei Bauvorhaben in Wasserschutzgebieten gelten besondere Vorschriften (z.B. "Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete, Technische Regeln, Arbeitsblatt W 101" herausgegeben vom Deutschen Verein des Gas- und Wasserfachs und "Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten (RISTWAG)" der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V.). Im Landkreis Ludwigsburg ist bei Aufschlussbohrungen im Zuge von Baugrundkundungen inner- und außerhalb von Wasserschutzgebieten das "**Merkblatt Grundwasseraufschlüsse**" des Amtes für Wasserwirtschaft und Bodenschutz, Besigheim, heute Fachbereich Umwelt beim Landratsamt Ludwigsburg von 1993, bzw. die aktuelle Fassung zu beachten. Alle Maßnahmen, die mehr als 10 m in den Boden einbinden, sind beim Landratsamt Ludwigsburg anzugepflichtig.

Ist mit einem **Sicker- Stau- und Grundwassereinfluss im Gründungsbereich** und höher zu rechnen (DIN 18533, Abb. 19-2a), sind die nachfolgend aufgezählten Vorgehensweisen ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu empfehlen:

Beispiele:

- Sorgfältige **Auswertung aller Grundwasserdaten** in den Akten, im Geotechnischen Bericht und in Grundwasserstandsmessungen, falls möglich bis über 30 Jahre zurück. **Befragung** von Nachbarn, ortskundigen Personen und Fachämtern über die Grundwasserverhältnisse. Festlegung eines **Bemessungswasserstandes** (Bau- und Endzustand) mit Sicherheitszuschlag, durch den Gutachter und die Wasserbehörde.
- Nach Möglichkeit **längerfristige Beobachtung der Grundwasserstände** in vorhandenen und bei der Baugrubenbegutachtung einzurichtenden Grundwassermesspegeln.
- **Untersuchung des Grundwassers** auf Betonaggressivität und auf andere Schadstoffe (DIN 4030). Bei **betonangreifendem Grundwasser** (Sulfat und andere Inhaltsstoffe) geeigneten Beton verwenden. Beim Überschreiten von Schadstoffgrenzwerten im Grundwasser muss das während der Bauzeit abgepumpte Grundwasser vor der kostenpflichtigen Einleitung in den Kanal oder Vorfluter ggf. über Absetzbecken und Aktivkohle gereinigt werden. Das kann hohe Kosten verursachen. Die örtlichen Genehmigungen, Grenzwerte und Einleitungsgebühren sind zu beachten.
- **Leichtflüchtige Schadstoffe**, wie z.B. **LHKW und AKW** im Boden und im Grundwasser, dürfen sich nicht in der Raumluft im UG anreichern! Andernfalls müssen aufwendige Flächenabdichtungen eingebaut werden.
- Abstimmung von **Ausbau und Nutzung des UG** auf die gegebenen Verhältnisse und die angestrebte Nutzungsklasse RN etc. Ggf. zusätzliche Außenisolierung, Wärmedämmung etc.. Auf eine angepasste Durchlüftung achten.
- Beachtung von niederschlagsabhängig auftretendem **Stauwasser, Sickerwasser oder Schichtwasser** aus dem Boden und der Arbeitsraumverfüllungen. Anstieg des Grundwasserspiegels bei Starkniederschlägen beachten, ggf. Notüberlauf in den Vorfluter.
- Je nach den Gegebenheiten, Ausführung des Untergeschosses druckwasserdicht als **Weiß-Gelbe, Braune oder Schwarze Wanne oder kombiniert** bis in Höhe von 30 bis 50 cm über dem Bemessungswasserstand um damit den Bereich des kapillaren Aufstiegs miteinzubeziehen, in stärker bindigen Böden 30 cm über Gelände, bei Brauner Wanne wegen dem notwendigen Anpressdruck
- 40 - 80 cm unter Gelände. Die Nutzungsdauer beachten. Eine Weiße Wanne bietet bessere Reparaturmöglichkeiten und hält i.d.R. länger, als eine Schwarze Wanne, ist aber nur mit größerem Aufwand (Gelbe Wanne, Schwarze Wanne) diffusionsdicht.
- Ein temporärer oder dauerhafter **Grundwasseraufstau** durch ein Bauwerk muss vermieden werden. Für den Schutz von Nachbarbauwerken etc. muss eine **Grundwasser-Umläufigkeit** nach den Regeln der Technik hergestellt werden.
- Möglichen **Auftrieb des Bauwerks** während der Bauzeit, während der Standzeit und bei einem möglichen Versagen der Abdichtung beachten und unbedingt vermeiden.
- Sorgfältige Planung einer temporären (Bauzeit) oder einer nur in Ausnahmefällen genehmigten dauerhaften **Grundwasserabsenkung** und eine Überwachung der Einflüsse während der Bauzeit und während der Standzeit auf die Nachbarbauwerke und Brunnen (Absenkungstrichter, Auftriebsverlust, Schrumpfen -> Setzungen, Vernässung der Keller etc., Beweissicherung).
- Ein **Drainageanschluss zur Ableitung von Grund-, Stau- und Sickerwasser in die Kanalisation** wird in Ludwigsburg i.d.R. nicht genehmigt. Bei seltenen und saisonal hohen Grund- und Sickerwasserständen sind Sondergenehmigungen zur kostenpflichtigen Einleitung durch das LRA als Notüberlauf möglich. In diesem Fall Festlegung des **Bemessungswasserstandes** durch die Wasserbehörde (höchster zu erwartender Grundwasserstand mit Sicherheitszuschlag von i.d.R. 0,5 bis 1,5 m) für eine rückspülbare **Sicherheitsdrainage in die Kanalisation**, ggf. mit Retentions/Sickerschacht mit Filterkies und mit Kontroll- und Reinigungsschächten. Rückstausicherer Anschluss an die Kanalisation oder an eine geeignete Oberflächenversickerung, falls erforderlich mit Pumpanlage. Bei der Festlegung des Bemessungswasserstandes sind auch mehrjährige Niederschlagsdefizite und Grundwasserabsenkungen, z.B. durch Brunnen, Bergbau, anderen bauliche Maßnahmen und Hochwasserstände von Flüssen etc. in der Nähe zu berücksichtigen. Drainagen fachgerecht anlegen (Höhe, Gefälle, Material, Prüfung, Reinigung etc.) und regelmäßig prüfen und warten. Grundwasserumläufigkeit beachten. Die Herstellung und der sichere Betrieb einer dauerhaften Dränung ist oft so aufwendig, dass eine druckwasserhaltende Abdichtung zumutbar ist und wirtschaftlicher sein kann.
- Die Bewertung von Versickerungsmöglichkeiten, z.B. von Oberflächen- und Dachflächenwasser, bedarf einer sorgfältigen geotechnischen Erkundung und ggf. Sickerversuchen in ausreichend versickerungsfähigem Boden.
- Bei **Versickerungen** von Drainagewasser und von Oberflächen- und Dachflächenwasser etc. muss der Einfluss auf Nachbarbauwerke beachtet, ggf. untersucht und vermieden werden.
- Für eine **Versickerung** von Drainagewasser sollte der Boden wegen der Verweildauer zur Reinigung eine Durchlässigkeit von $k_f = 1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-6}$ m/s haben (Arbeitsblatt DWA-A 138). Ab $\leq 10^{-5}$ ist die Versickerungsfähigkeit eingeschränkt.
- Der **Arbeitsraum** um das Bauwerk und die **Fläche** entlang des Bauwerks muss mit geeignetem Material lagenweise verfüllt und je nach geplanter Nutzung und Belastung verdichtet und mit Gefälle nach Außen befestigt werden. Bei sandigen Böden sollte ein filterstabiles Vlies gegen Feinkorn eingebaut werden. Ggf. können Betonfiltersteine, Filtermatten oder Dränplatten verwendet werden.
- In Tallagen ist die **Überschwemmungs- und Hochwassergefahr** zu beachten!
- **Rechtzeitige Antragstellung** bei der Wasserbehörde (LRA, Stadtverwaltung etc.) auf wasserrechtliche Erlaubnis für alle, das Grundwasser betreffende Untersuchungen, Eingriffe und Baumaßnahmen. Z.B. Bohrungen in das Grundwasser, Pumpversuche, notwendige temporäre GW-Absenkung während der Bauzeit (z.B. Wasserhaltung, Absenkung Sohlfilter, Drainage, Reinigung, Einleitung in die Kanalisation etc.), für eine dauerhafte GW-Umlleitung während der Standzeit, falls unvermeidbar für eine temporäre und kostenpflichtige Dränung und Einleitung während der Standzeit und für alle Maßnahmen, die mehr als 10 m in den Boden einbinden.

Wasserhaltung in Baugruben

In Baugruben und Gräben, welche die Grundwasseroberfläche aufdecken, muss der Wasserspiegel durch Abpumpen während der Bauzeit soweit abgesenkt werden, dass die Aushubsohle trockenfällt und eine fachgerechte Gründung möglich ist. Diese temporäre Absenkung des Grundwassers reicht je nach dem Bodenaufbau mit einem **Absenkungstrichter** mehr oder weniger weit über das Baufeld hinaus und darf in keinem Fall die Standfestigkeit benachbarter Bauwerke oder die Nutzung von Brunnen und Quellen beeinträchtigen. Das kann v.a. in gut wasserdurchlässigen Lockersedimenten und in klüftigen Gesteinen der Fall

sein, wo ein größerer Absenkungstrichter entstehen kann und es bei bindigen Böden zu praktisch nicht reversiblen Setzungen durch Auftriebsverlust (Gewichtszunahme des Bodens) und durch Bodenschrumpfen von Weichböden kommen kann. Eine Wasserhaltung bewirkt eine Versteilung der Grundwasserfläche und eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit mit Ausschwemmungen und Auslaugungen. Hier ist vor Baubeginn eine Beweissicherung durchzuführen und der Absenkungstrichter ist sorgfältig zu berechnen und zu überwachen. Auch auf zutretendes Oberflächenwasser achten, ggf. umleiten und ableiten. **Es wird zwischen offener und geschlossener Wasserhaltung unterschieden.** Bei der **offenen Wasserhaltung** (siehe Abb. 18-1) wird das zufließende Grund- und Oberflächenwasser in offenen Gräben oder Dränen innerhalb der Baugrube gesammelt, einem Pumpensumpf zugeleitet, abgepumpt und ggf. gereinigt in die Kanalisation geleitet. Stark bindige Böden und gemischtkörnige grobe Flusskiese mit nicht zu großer Durchlässigkeit können bis in 4 bis 6 m Tiefe entwässert werden. In kiesigen Böden kann bei offener Wasserhaltung nur eine Tiefe von 1 bis 2 m erreicht werden. In sandigen Böden ist eine offene Wasserhaltung nur begrenzt anwendbar. Hier wird das Untergeschoss oft unter Wasser betoniert und dann leergepumpt (häufige Bauweise z.B. in Berlin). Bei offener Wasserhaltung ist ein Aufweichen der Sohle oder Sohlaufbrüche zu vermeiden. Kommt der hydraulische Druck von unten auf eine wenig durchlässige Schicht der Eigenlast des Bodens nahe, kann es zum **hydraulischen Grundbruch** kommen. Dieser Gefahr muss mit Entspannungsbrunnen begegnet werden. Ist eine offene Wasserhaltung nicht möglich, muss der Grundwasserspiegel als **geschlossene Wasserhaltung** durch Bohrbrunnen außerhalb der Baugrube abgesenkt werden. Diese Maßnahme ist aufwendiger als die offene Wasserhaltung und es fällt mehr Wasser zum Abpumpen an. Die Brunnenabstände betragen je nach Bauvorhaben 8 bis 20 m. Der Brunnendurchmesser beträgt 300 bis 900 mm. In mittel- bis feinkörnigen Sanden mit leichtem Schluffanteil kann das **Vakuumverfahren** eingesetzt werden. Hier wird das Grundwasser über Vakuumlanzen durch Unterdruck abgesaugt. In tonmineralhaltigen und homogenen Schluffböden (v.a. in tonigen Rutschmassen) kann die **elektroosmotische Entwässerung** die Fließfähigkeit des Grundwassers verbessern. Dabei wird ein Potentiialgefälle zwischen zwei Elektroden genutzt. Das Wasser fließt in einem Gleichstromfeld der Anode zu und wird abgeschöpft.

4.5.2 Bauen außerhalb des Grundwassers

Bei Bauvorhaben in **nichtbindigen Böden** muss mindestens mit Bodenfeuchte und nichtdrückendem Wasser gerechnet werden. Auch wenn der geschlossene Grundwasserhorizont dauerhaft deutlich unter der Gründungssohle liegt, ist in **bindigen und gemischtkörnigen Böden** (auch in Lösslehm und in schluffigen Feinsanden) mit einer Durchlässigkeit $k_f < 10^{-4}$ mit zeitweise aufstauendem und dann drückendem Niederschlagswasser, Sickerwasser und Stauwasser, z.B. in verfüllten Arbeitsräumen zu rechnen und dieses Wasser kann unter Druck in die Wände und Kellerräume eindringen. Auch den Kapillaraufstieg beachten. Hier ist für alle Gebäude eine geeignete Abdichtung nach den einschlägigen Vorschriften vorzusehen. Eine Dränung der Arbeitsräume, der Fundamente und der Kellersohle über die Standzeit mit Anschluss an die Kanalisation wird in Ludwigsburg nicht zugelassen (Kap. 4.5.1.1) Die Einzelmaßnahmen sind in DIN-Vorschriften geregelt und müssen vom geologischen Gutachter und vom Architekten den jeweiligen Verhältnissen und Anforderungen angepasst und mit den Fachbehörden abgestimmt werden. Nachfolgend einige Beispiele ohne Anspruch auf Vollständigkeit:

Beispiele:

- Es sind die für den Standort geeigneten **Abdichtungsmaßnahmen mindestens gegen Bodenfeuchte nach DIN** anzuwenden (Horizontalisolierung, Abdichtung von aufgehenden Wänden mit Bitumen-/Kunststoffbahnen etc., vertikale druckfeste Sickerschicht, grobkörnige Schüttung unter Fußböden etc.). Schon bei „durchlässigen“ Böden ($< 10^{-4} - 10^{-6}$) möglichen temporären **Aufstau und Druck von Sickerwasser** im verfüllten Arbeitsraum etc. beachten. Die Lichtschächte müssen dann auftriebsicher und wasserdicht oder ≥ 30 cm über höchstem GW-Stand sein. Ggf. Schwarze oder/und Weiße-Gelbe oder Braune Wanne einbauen.
- Nichtkontaminiertes **Regen-, Stau- und Sickerwasser aus einer Drainage** darf nur im Boden versickert oder mit einer Genehmigung kostenpflichtig in die Kanalisation eingeleitet werden. Eine Versickerung ist in die im Raum Ludwigsburg oft vorkommenden Lehmböden nur eingeschränkt und langsam möglich. Sickerwasser kann sich daher in bindigen Böden auch drückend anstauen. Ein **Drainageanschluss zur Ableitung von Grund-, Stau- und Sickerwasser in die Kanalisation** wird in Ludwigsburg i.d.R. nicht genehmigt. Bei besonderen hydrogeologischen Verhältnissen und bei seltenen und hohen Sickerwasser-Anstauungen sind Sondergenehmigungen zur temporären und kostenpflichtigen Einleitung in die Kanalisation ab einem vom LRA festzulegenden Bemessungswasserstand als Notüberlauf möglich.
- Für eine **Versickerung von Drainagewasser** sollte der Boden wegen der Verweildauer zur Reinigung eine Durchlässigkeit von $k_f = 10^{-3} - 10^{-6}$ m/s haben. Ab $< 10^{-5}$ ist die Versickerungsfähigkeit eingeschränkt.
- **Genehmigte Drainagen fachgerecht anlegen** (Höhe, Gefälle, Material, Kontroll- und Reinigungsschächte etc.) und regelmäßig prüfen und warten.
- Bei einer **Versickerung** von Drainagewasser und von Oberflächen- und Dachflächenwasser etc. muss der Einfluss auf die Nachbarbauwerke beachtet, ggf. untersucht und vermieden werden.
- Eine genehmigte Drainage ersetzt keine **fachgerechte Abdichtung** von UG-Böden und UG-Wänden.
- Bei **hohen Anforderungen an die Trockenheit** im UG, z.B. Wohnkeller, Lager- oder EDV-Räume etc. ist eine besonders gute Abdichtung bzw. Kombination notwendig. Auf eine angepasste Kellerlüftung ist zu achten. Die Abdichtungsebene sollte mindesten 50 cm über dem höchsten Grundwasserstand liegen.
- Der **Arbeitsraum** um das Gebäude und die **Fläche** entlang des Bauwerks muss mit geeignetem Material lagenweise verfüllt und je nach der geplanten Nutzung und Belastung verdichtet und mit Gefälle nach Außen befestigt werden. Bei sandigen Böden sollte ein filterstables Vlies gegen Feinkorn eingebaut werden. Ggf. können Betonfiltersteine, Filtermatten oder Dränplatten verwendet werden.

Die dauerhafte Abdichtung des Untergeschosses eines Bauwerks gegen Feuchtigkeit und Wasser ist für dessen Nutzung und Werterhalt von höchster Bedeutung. Die Materie kann je nach der Raumnutzungsklasse, nach dem geologischen Untergrund und nach den Grundwasserbeziehungen komplex sein und muss vom geotechnischen Gutachter, vom Architekten/Planer und von den ausführenden Firmen nach den einschlägigen Vorschriften untersucht, geplant, bearbeitet und überwacht werden.

4.5.3 Frostempfindlichkeit, Bodenaustrocknung, Schrumpfen und Quellen

Man unterscheidet:

- **Frostsenkung**, z.B. an schweren Fundamenten und Bauwerken durch Ausdehnung, seitliches Ausweichen und Setzung.
- **Frosthebung**, z.B. an Straßen und gepflasterten Wegen durch Ausdehnung und Hebung mit Verlust der Tragfähigkeit.
- **Frostzerstörung**, z.B. an Wasserleitungen, Kanälen und an kapillar saugenden Baustoffen durch Ausdehnung gefrorenen Wassers.

Bei **nichtbindigen, rolligen Böden** wird sie Anordnung der Bodenkörper bei Frost nicht verändert, die Hebung ist gering und verläuft langsam. Der Boden friert homogen mit gleichmäßiger Frosthebung (Eiszement). Diese Böden haben nach dem Auftauen in etwa die ursprüngliche Tragfähigkeit. Ab ≤ 7 Masse %-Feinanteil (0,063 mm) sind Kies und Sand frostsicher.

Bei **bindigen Böden** setzt sich das Wasser bei Frost in Form von unregelmäßigen Eislinsen und Eisbändern ab, es wird Wasser aus tieferen Bodenbereichen zur kühleren Bodenoberfläche kapillar und durch Bildung eines Unterdrucks angezogen. Das Wasservolumen vergrößert sich durch den Frost um ca. 9 %. Der Boden friert v.a. bei Böden der Klasse F3 inhomogen und schnell mit großem Hebeungsdruck und ungleichmäßiger Hebung. Nach dem Auftauen habe diese ehemals eisreichen und frostempfindlichen Böden eine verminderte Konsistenz und Tragfähigkeit und es bildet sich ein Porenwasserüberdruck aus, wodurch die Scherfestigkeit des tauenden Bodens reduziert wird. Die Hohlräume der Eiskristalle brechen zusammen.

Gemischtkörnige Böden können je nach Anteil und Plastizität des Feinkorns ein ähnliches Frostverhalten wie die feinkörnigen Bodenarten haben und können gering bis sehr frostempfindlich sein. In diesen Böden kommt es wegen des unregelmäßig und oft nesterförmig verteilten Feinkorns zu unterschiedlichen Wasseranreicherungen. Das führt zu ungleichen Frosthebungen und in den Tauwetterintervallen zu unterschiedlichen Verformungen. Bei frostempfindlichen und schrumpfempfindlichen Böden sind angepasste Gründungstiefen erforderlich.

Felsgesteine, die in ihrem kapillarfeinen Porengefüge oder auf den Trennflächen Wasser aufnehmen und dort bei Frost Eis bilden, gelten als frostempfindlich. Die Frostempfindlichkeit von Fels im Gebirgsverband ist u. a. von der mineralogischen Zusammensetzung und von der Entstehung der Gesteine, sowie vom Kluftsystem (Trennflächen) abhängig. Frostempfindliche Gesteine finden sich vor allem in den geologischen Formationen des Späten Karbons, des Rotliegenden, des Buntsandsteins, des Muschelkalks und des Keupers, soweit schluffig-tonige Bindemittel enthalten sind, z.B. schluffig-tonige Sandsteine, tonige Grauwacke, Tonschiefer, Schieferton, Mergelkalkstein, Kalkmergel. Näherungsweise gelten harte Festgesteine mit Druckfestigkeiten von > 60 MN/m² als frostsicher, mit $30 - 60$ MN/m² als schwach frostempfindlich und ab < 30 MN/m² gelten sie als stark frostempfindlich.

Die **frostsichere Gründungstiefe** beträgt nach der DIN 1054 in Verbindung mit DIN EN 1997-1 mindestens 0,8 m, kann aber in strengen Wintern und je nach den örtlichen Gegebenheiten auch im Flachland tiefer liegen. Die Gründungstiefe richtet sich nach der Frosteinwirkungszone nach RStO 12 und nach dem Bodenaufbau. Sicherheitshalber sollte mindestens 1 - 1,2 m und in höheren und ausgesetzten Lagen auch bis 1,5 m u.G. oder darüber gegründet werden. Besondere Beachtung ist diesbezüglich auch auf Garageneinfahrten und Stellplätze zu legen. Hier soll mindestens 0,6 m frostunempfindliches Material unter der Asphaltdecke oder unter den Betonformsteinen eingebaut werden, so dass eine Gesamtmautigkeit von 0,65 - 0,8 m erreicht wird. Um eine flach gegründete Bodenplatte ist eine umlaufende Frostschürze mit ausreichender Tiefe oder eine gleichwertige Konstruktion, z.B. Frostkoffer, Frostschirm anzulegen. Ludwigsburg liegt in der **Frosteinwirkungszone I** (geringe Frostgefährdung, geringe Eindringtiefe). Die Höhenlagen von Stuttgart liegen in der **Frosteinwirkungszone II** (mittlere Frostgefährdung, mittlere Eindringtiefen). Im topographisch mittelgebirgsartigen Stuttgarter Raum mit Höhen zwischen 200 und 500 mNN liegen die **Frosteingriffstiefen** je nach Höhe und Windaussetzung bei ca. 0,6 – 1,3 m u.G. Die Hochgebiete im Schwarzwald, auf der Schwäbischen Alb und in Oberschwaben-Allgäu liegen in der **Frosteinwirkungszone III** (große Frostgefährdung, große Eindringtiefen, ca. 1,5 m oder mehr).

Klasse	Frostempfindlichkeit	Bodenart	Bodengruppe (DIN 18196) (Abkürzungen siehe Tabelle 7, 8e) * = stark	
F1	nicht frostempfindlich Frostschutzmaterial	nicht bindige, grobkörnige Böden: Sande und Kiese	GW, GI, GE, SW, SI, SE	
F2	gering bis mittel frostempfindlich Schrumpfgefahr mittel	ausgeprägt plastische Tone, organogene Böden, (gemischtkörnige Böden)	TA, OT, OH, OK	GU ¹ , GT, SU, ST
F3	sehr frostempfindlich Schrumpfgefahr groß	sonstige feinkörnige Böden: Tone und Schluffe, gemischtkörnige Böden mit hohem Feinkornanteil	UL, UM, UA, TL, TM, OU	GU*, GT*, SU*, ST*

Abb. 19-5: Frostempfindlichkeit von Lockergesteinen nach ZTVE-StB

GU¹ gehören zu F1, wenn Korngröße $< 0,063$ mm von 5,0 Gew.-% bei Ungleichförmigkeitszahl $\geq 15,0$ oder 15,0 Gew.-% bei Ungleichförmigkeitszahl $\leq 6,0$.

Zu beachten sind:

- **Frosteindringtiefe:** in tiefen Lagen 60 - 80 cm, in höheren und klimatisch ausgesetzten Lagen bis über 150 cm.
- **Gründungstiefe:** Außenfundamente bei schrumpfunempfindlichen Böden ca. 120 – 150 cm, bei schrumpfempfindlichen Böden ≥ 150 cm.
- **Frostschutztiefe im Straßenbau:** im Allgemeinen 120 cm.

Eine **Schrumpfung** des Bodens kann witterungsbedingt und bei Grundwasserschwankungen in feinkörnig-bindigen Böden (Ton, bei organischen Bestandteilen, Lehm und Schluff) auftreten. Diese Böden trocken bei Grundwasserabsenkungen und in heißen Sommern mit langen Trockenperioden bis in über 1 m Tiefe und beim Wasserentzug durch große Bäume auch tiefer aus, ziehen sich zusammen und es kommt zu einer Volumenabnahme. Es bilden sich bis über 1,5 m tiefe Risse, in denen das Oberflächen- und Regenwasserwasser in den Boden eindringen kann. Das kann v.a. bei Flachgründungen ohne Unterkellerung zu Rissen in den Bauwerken, zu Schieflagen der Bauwerke und zu Schäden an Leitungen führen. Um das zu verhindern, muss je nach der Bodenart in einer geeigneten Tiefe und ggf. mit Dehnungsfugen gegründet werden. Baugruben sollten v.a. im Sommer nur kurz offenbleiben, da der bindige Boden auch unter einer Folienabdeckung austrocknen und nach der Bebauung wieder quellen kann. Hebungen und Risse können die Folgen sein.

Bei **Ton-, Lehm- und Sulfatgesteinen** kann es bei Wasserzutritt zur **Volumenzunahme** durch Quellen kommen. Durch tiefe Erdwärmbohrungen besonders bekannt geworden ist das **Sulfatmineral Anhydrit** – CaSO_4 , das sich bei Wasserzutritt unter bis zu 61 % Volumenzunahme (Hydratation) in Gips – $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ umwandelt. Anhydrit in enger Wechsellagerung mit 10 – 20 Gew.% Ton führt zu einem weit ausgeprägteren Quellverhalten bei Wasserzutritt als Anhydrit ohne Ton. Die aus der Quellung resultierenden Gebirgshebungen können über Jahrzehnte anhalten und Meterbeträge erreichen. Der dabei auftretende Umwandlungindruck ist erheblich (bis über 5 MN/m²) und hat schon zu großen und schädlichen Erdbewegungen, z.B. durch Sohlhebungen beim Tunnelbau im Gipskeuper (Stuttgart, Leonberg) und bei Erdwärmbohrungen in den Gipskeuper (Staufen) mit millionenteuren Sanierungen geführt. **Tonige Böden und -Gesteine und feinkörnige Lehme** können ebenfalls durch Wasseraufnahme quellen. Es kommt hier zur Wassereinlagerung in die Zwischenschichträume der Tonminerale und zur osmotischen Quellung durch Wasseraufnahme in den Poren des Tons an den Tonmineraloberflächen. Schon an flachen Hängen können feuchte und nasse Tone auch ins Rutschen geraten, was oft am säbelartigen Wusch von Bäumen zu erkennen ist, z.B. im Knollenmergel des Mittleren Keupers im Raum Stuttgart. Tonquellung ist nicht so ausgeprägt und ist i.d.R. besser beherrschbar als Anhydritquellung, erreicht Drücke von max. 2 MN/m² und Hebungen im Zentimeter- bis Dezimeterbereich.



Abb. 20:
Das Bild zeigt einen Garagenanbau an einem Haus in Ludwigsburg-Poppenweiler.
Ursache für den großen Riss ist vermutlich der bindige Lehmboden, der in trocknen Jahreszeiten tief ausgetrocknet und geschrumpft ist. Mit ursächlich könnten auch wasserverbrauchende Bäume in der Nähe der Garagenwand sein. Die flach gegrünete Garagenwand hat sich mit dem schrumpfenden Boden gesetzt. Solche Schäden sind im Ludwigsburger Raum und im Strohgäu wegen der weitverbreiteten Lehmböden nicht selten.

5. Tabellen

Tabelle 1:

Baugrundqualität im Raum Ludwigsburg

Ohne Gewähr! Im Gelände können Abweichungen vorkommen. Es ist immer eine fachliche Untersuchung und Beurteilung erforderlich.

Überwiegend günstiger Baugrund

Regelmäßiger Schichtaufbau mit einheitlich guter Tragfähigkeit und geringer Setzungsfähigkeit und Verformbarkeit der Schichtglieder. Gemischtkörnige Böden mit Steingerüst und **mindestens halbfester Konsistenz** des Zwischenmittels. Kein Grundwasser in der Baugrube. Sickerwasser ist möglich. Bei Fels sind erhöhte Aushubkosten möglich.

Beispiele

- Hanglehm und -schutt, Fließerde, Tal-(Wander)schutt mit dichtem Steingerüst (Zwischenmittel st – hf).
- Lehmarme Kiese ohne Schlicklinsen, Hochwassergefahr in Tallagen beachten!
- Frischer bis mäßig verwitterter Gipskeuper (V0 - V2).
- Frischer bis mäßig verwitterter, aber teils veränderlich fester Lettenkeuper (V0 - V2). (1)
- Gering geklüfteter und gering bis mäßig verwitterter Oberer Muschelkalk. (2)

Überwiegend durchschnittlicher Baugrund

Teilweise unregelmäßiger Schichtaufbau, überwiegend mittlerer bis guter Tragfähigkeit, mäßiger Setzungsfähigkeit und Verformbarkeit der Schichtglieder. Fein- bis gemischtkörnige Böden von **mindestens steifer Konsistenz**, bei hohen Lasten **mindestens halbfest!** Verwitterung und Klüftung sind möglich. Grund- und Sickerwasser in der Baugrube sind möglich. Bei Fels sind erhöhte Aushubkosten möglich. * Verwitterter Gipskeuper ist oft stark kompressibel.

Beispiele

- Einbaumaterial (homogene und verdichtete Auffüllung – teilweise brauchbar, Schadstoffe beachten!).
- Auenlehme, Bachablagerungen (st – hf), Quellen, Schrumpfen und Hochwassergefahr beachten!
- Fließerden, Hanglehm, Hang- und Talschutt als zusammenhängende Decken am Hangfuß (st – hf).
- Löss und eingeschränkt Lösslehm außerhalb des Grund/Stauwassers, mindestens (st – hf).
- Verwitterter und ausgelaugter Gipskeuper* ohne/mit Hohlraumbildung und verwitterter Lettenkeuper (V3)
- Geklüfteter und schwach entfestigter Oberer Muschelkalk.

Überwiegend ungünstiger bis unbrauchbarer Baugrund

Stark unterschiedlicher Schichtaufbau mit geringer Tragfähigkeit. Starke Setzungsfähigkeit und Verformbarkeit der Schichtglieder. Grundwasser in der Baugrube ist möglich. Sehr starke Verwitterung, Entfestigung und Verkarstung, Hohlräume. Starkes Quellen und Schrumpfen bei jahreszeitlichen Wassergehaltsänderungen, Bodenbildung (V4 - V5). Bindige Böden mit **weicher bis breiger Konsistenz sind unbrauchbar**.

Beispiele

- Inhomogene, oft lehmig-steinige und gering verdichtete Auffüllungen (als Baugrund unbrauchbar).
- Lösssedimente im Grundwasser oder im Schwankungsbereich oder mit Stauwasserhorizonten.
- Lösssedimente mit engräumig wechselnder Zusammensetzung und Konsistenz.
- Weicher Hang-, Talschutt und Tallehm ohne Steingerüst, als Baugrund oft unbrauchbar.
- Weiche und kompressible Auenlehme, Schwemmlehme, Bachablagerungen (stark kompressibel, oft unbrauchbar), Hochwasser!
- Stark organische Böden, Torf, Schlick (unbrauchbar), Schlicklinsen.
- Verwitterter, plastifizierter und ausgelaugter tonig-schluffiger Gipskeuper mit Hohlraumbildung und/oder im Grundwasser. An Tahängen und an Hängen im Gipskeuper sind Rutschungen möglich (V3 – V5).
- Quell- und schrumpfempfindliche Tone im Keuper und im Quartär.
- Anhydrit (Quellung und Sohlhebung) und Gips (Auslaugung, Hohlraumbildung).
- Tief verwitterte und zersetzte Ton- Mergel- und Schluffsteine des veränderlich festen Lettenkeupers, v.a. im Hangbereich (V3 – V5).
- Stark geklüfteter, verwitterter, entfestigter und weggelöster Oberer Muschelkalk mit Spaltenbildung (V3, V4).
- Bereiche mit Erdfällen, größeren Spalten und größeren Lösungshohlräumen (unbrauchbar).
- Bituminöse und pyritführende Tongesteine, Gefahr von Baugrundhebung bei Austrocknung.

Verwitterungsstufen der Festgesteine nach Wallrauch 1969:

V0 = unverwittert, V1 = angewittert, aufgewittert, V2 = mäßig verwittert/mäßig entfestigt, V3 = stark verwittert/entfestigt,

V4 = vollständig verwittert/zersetzt - Lockergestein, V5 = zersetzt, Bodenbildung, st-hf = steif bis halbfest

(1) Bei Karbonat- und Sandsteinbänken oft Bodenklasse 5 - 6, sehr selten 7 nach der „alten DIN 18300“

(2) Nicht aufgelockert oft Bodenklasse 6 - 7, Reiß- und Meißenarbeiten können erforderlich sein.

* Verwitterter Gipskeuper kann tragfähig sein, ist aber oft stark kompressibel.

Tabelle 1a:**Bodenarten und ihre Eigenschaften** (Fortsetzung nächste Seite).

Aus: W. Heinrichs et al. (2016): Baugrund und Fundament. Ein Ratgeber von RWE Power, Köln.

Kies (G) und Sand (S)		Vorkommen	Baugrundeignung
Art	Eigenschaften		
<ul style="list-style-type: none"> ■ nichtbindiger bzw. grobkörniger Boden ■ Korndurchmesser Kies: 2,0 mm bis 63,0 mm ■ Korndurchmesser Sand: 0,06 mm bis 2,0 mm ■ Kornform: Kanten abgeschliffen, eckig oder rund 	<ul style="list-style-type: none"> ■ hohe mechanische Kornfestigkeit ■ gut belastbar ■ drücken sich unmittelbar nach Lastaufbringung zusammen ■ lassen sich gut nachverdichten ■ lassen sich gut entwässern 	<ul style="list-style-type: none"> ■ häufig in tieferen Lagen ab 4 m und mehr ■ selten oberflächennah und deshalb auch selten direkter Baugrund 	gut bis sehr gut
Schluff (U)			
Art	Eigenschaften	Vorkommen	Baugrundeignung
<ul style="list-style-type: none"> ■ bindiger bzw. feinkörniger Boden ■ Korndurchmesser: 0,002 mm bis 0,06 mm ■ Kornform: wie Sand, nur feiner 	<ul style="list-style-type: none"> ■ winzige enge Poren, deshalb wasserhaltend und feucht ■ lässt sich zusammenklumpen und formen ■ weicht bei Wasserzutritt auf ■ mittelmäßig belastbar, häufig jedoch für ein Eigenheim noch ausreichend ■ kann sich nach Lastaufbringung über eine längere Zeit zusammendrücken ■ lässt sich schwer entwässern 	<ul style="list-style-type: none"> ■ sehr selten in reiner Form, häufig in Mischformen 	gut bis mäßig
mittelfeiner Schluff (U) [Löss]			
Art	Eigenschaften	Vorkommen	Baugrundeignung
<ul style="list-style-type: none"> ■ wie Schluff, nur gleichmäßige Körnung ■ Korndurchmesser: 0,01 bis 0,05 mm ■ hoher Kalkgehalt 	<ul style="list-style-type: none"> ■ wie Schluff ■ zusätzlich: durch Kalkanteil ist der Boden verkittet und relativ gut tragfähig 	<ul style="list-style-type: none"> ■ in der Eiszeit vom Wind verfrachteter Boden, der in großen Mulden, zum Beispiel der Kölner Bucht, abgelagert wurde, zum Teil große Mächtigkeiten 	in der Regel gut
tonig, sandiger Schluff (t, s, U) [Lehm]			
Art	Eigenschaften	Vorkommen	Baugrundeignung
<ul style="list-style-type: none"> ■ bindiger feinkörniger Boden, vermischt mit grobkörnigem Sand und feinsten Schichtmineralien des Tons ■ Korndurchmesser: 0 bis 2,0 mm 	<ul style="list-style-type: none"> ■ wie Schluff 	<ul style="list-style-type: none"> ■ am häufigsten verbreiteter Boden im rheinischen Braunkohlenrevier ■ oberflächennah, bis zu 5 m und mehr anstehend ■ deshalb auch häufigster Baugrund 	gut bis mäßig
tonig, sandiger, humoser Schluff (t, s, h, U)			
Art	Eigenschaften	Vorkommen	Baugrundeignung
<ul style="list-style-type: none"> ■ wie Lehm ■ Unterschied: merklicher Anteil an humosen Stoffen (Pflanzenreste) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ dunkle Farbe* ■ hoher Wassergehalt ■ lässt sich stark zusammendrücken ■ wenig oder gar nicht belastbar ■ verliert an Volumen (Zersetzung humoser Anteile) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ häufiger Boden in 6 bis 7 m Tiefe in Flussniederungen, den so genannten Auegebieten, als Bach- oder Flussablagerungen anzutreffen 	nicht geeignet

* Zwar nicht immer zutreffend, doch als Faustregel für den Nichtfachmann sollte gelten: Je dunkler ein Boden, umso mehr ist dessen Baugrundeignung in Frage zu stellen.

Fortsetzung Tabelle 1a: Bodenarten und ihre Eigenschaften

Ton (T) Art	Eigenschaften	Vorkommen	Baugrundeignung
<ul style="list-style-type: none"> ■ bindiger bzw. sehr feinkörniger Boden ■ Korndurchmesser: < 0,002 mm ■ Kornform: plättchen- bis nadelförmig 	<ul style="list-style-type: none"> ■ meist hellere Farbe ■ winzige enge Poren ■ stark wasserhaltend ■ große Kapillarhöhe ■ wasserundurchlässig ■ stärker zusammendrückbar, jedoch mit langsamem Ablauf ■ lässt sich kaum verdichten ■ sehr wasserempfindlich, weicht auf, quillt auf 	<ul style="list-style-type: none"> ■ selten in reiner Form ■ in Oberflächennähe meist nur als Mischform (Lehm) ■ in tieferen Lagen als Trennschichten der gespannten Grundwasserhorizonte 	mäßig bis bedingt brauchbar
Torf (H) Art	Eigenschaften	Vorkommen	Baugrundeignung
<ul style="list-style-type: none"> ■ organische Masse (Reduktion von pflanzlichen Bestandteilen unter Luftabschluss) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ dunkle Farbe ■ sehr hoher Wassergehalt ■ verliert stark an Volumen (Zersetzung der organischen Stoffe) ■ lässt sich sehr stark zusammendrücken ■ nicht belastbar 	<ul style="list-style-type: none"> ■ häufig in Niederungen, den so genannten Auegebieten, als Fluss- oder Bachablagerungen anzutreffen ■ selten tiefer als 4 m ■ Verbreitung in Linsen- oder Bandform, wechselnd in Lehm oder Auelehm eingeschlossen 	nicht geeignet

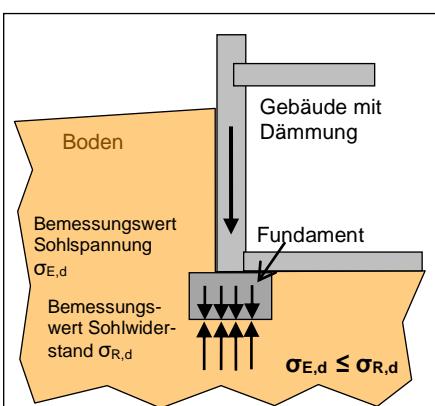
Tabelle 2:
Bodenmechanische Kenn- und Rechenwerte (DIN 1054, DIN 1055)

Bodenmechanische Kenn- und Rechenwerte dienen zur baugrundtechnischen Einordnung von Böden und als Grundlage für erdstatistische Berechnungen. Bei kleineren und mittleren Bauvorhaben und bei den Vorplanungen für größere Bauvorhaben wird aus Zeit- und Kostengründen manchmal auf Versuche zur Ermittlung von Bodenkennwerten verzichtet, sofern der Boden bei der Felderkundung sicher beurteilt werden konnte. Hier können dann die charakteristischen Werte für erdstatistische Berechnungen (Bodenkennwerte) der DIN 1055 und der DIN 1054 benutzt werden.

Die wichtigsten Kenn- und Rechenwerte sind:

- **Gamma γ** = **Wichte** in kN/m^3 , spezifisches Gewicht, Gewicht eines Körpers im Verhältnis zu seinem Volumen.
 $\gamma = \text{Masse} \times \text{Erdbeschleunigung} : \text{Volumen}$. γ' = Wichte unter Auftrieb.
- **Phi φ'** = **Effektiver Reibungswinkel** (des drainierten Bodens) in Grad, Parameter für die Scherfestigkeit.
Der Widerstand, der bei einer Scherverschiebung im Material mobilisiert wird, bzw. der Winkel, unter dem ein Festkörper oder ein körniges Material belastet werden kann ohne zu versagen oder abzurutschen. Er bestimmt bei einem nichtbindigen Boden mehr oder weniger alleine die Scherfestigkeit und ist abhängig von der Lagerungsdichte, von der Kornform (Rauheit) und von der Kornverteilung. Bei bindigen Böden setzt sich die Scherfestigkeit aus dem Reibungswinkel und der Kohäsion zusammen und ist damit auch vom Wassergehalt abhängig. Der Reibungswinkel granularer Medien wird durch Scherversuche ermittelt. Bei einem kohäsionslosen, trockenen Boden ist die maximale Böschungsneigung (Schüttwinkel Theta θ) in etwas gleich seinem Reibungswinkel (trockener Sand ca. 30°, Kies ca. 30 – 40°, mit Blöcken durchsetzte Schutthalden in der Natur und scharfkantiger Schotter ca. 45°). Feuchte Sande und feuchte, feine Kiese haben eine Scheinkohäsion (Sand max. 8 kN/m^2) und haben daher steilere Schüttwinkel. Hier gilt $\theta \neq \varphi$. Bei ca. 20 % Wasseranteil kann Sand senkrecht stehen. Mit der Verdichtung wächst der Reibungswinkel. Der Schüttwinkel von bindigen Böden sagt dagegen wenig über den Reibungswinkel aus.
- **c'** = **Effektive Kohäsion** (des drainierten Bodens, kein Porenwasserüberdruck) in kN/m^2 . Parameter für die Scherfestigkeit, innerer Zusammenhalt und Haftfestigkeit bindiger Böden zwischen den Körnern. Er ist abhängig vom Anteil der Tonminerale, vom Wassergehalt und vom Sättigungsgrad. Besonders gewachsener Boden ist oft stark kohäsiv und bleibt bei nicht allzu hohen Strukturen stabil, so lange er nicht zu nass, ausgetrocknet ist oder belastet wird. Ungestützte senkrechte Böschungen sind im Bauwesen lastfrei nur bis 1,25 m Höhe erlaubt. Mit zunehmendem Wassergehalt nimmt die Kohäsion ab und ist bei breiigem Boden null. Feuchte Sande und feuchte, feine Kiese haben eine Scheinkohäsion (max. 8 kN/m^2), die für geotechnische Berechnungen im Normalfall nicht berücksichtigt wird.
- **E_s** = **Der Steifemodul** in MN/m^2 , kennzeichnet die Zusammendrückbarkeit des Bodens und ist ein Materialkennwert zur Berechnung der Setzung (der Baugrundverformung) eines Bodens. Es ist vom Gefüge und von der Lagerungsdichte abhängig.
- **k_s** = **Der Bettungsmodul** in kN/m^3 ist das Maß zur Beurteilung der Setzung eines Baugrundes bei Belastung durch ein Fundament. Es ist der Quotient aus der durch das Fundament auf den Boden ausgeübten Sohlnormalspannung $\sigma_{E,d}$ [kN/m^2] und der daraus resultierenden Setzung S [m]. Der Bettungsmodul wird im Platten-druckversuch ermittelt.
- **Beta β** = **Böschungswinkel** der Baugruben
- **Sigma σ_0** = **Sohlnormalspannung**, vertikale Druckspannung, die ein Fundament infolge von Bauwerkslasten auf den darunterliegenden Baugrund überträgt, ohne das es zu Setzungen oder Grundbuch kommt.
- **Sigma $\sigma_{E,d}$** = **Bemessungswert der einwirkenden Sohlnormalspannung** in kN/m^2 an der Fundamentunterkante. Sohldruck, der zugelassen werden kann.
- **Sigma $\sigma_{R,d}$** = **Bemessungswert des Sohlwiderstandes (Sohldruck, Gundbruchwiderstand)** in kN/m^2 aus Tabelle. Widerstand des Baugrunds (Tragfähigkeit) in Wechselwirkung mit dem Bauwerk.

Die einwirkende Sohlnormalspannung muss kleiner oder gleich dem Bemessungswert des Sohlwiderstands ($\sigma_{E,d} \leq \sigma_{R,d}$) sein.



Zur Verdeutlichung:

Das Gewicht von 100 kN entspricht einer Masse von 10,2 Tonnen. Der Fußabdruck einer schweren Person entspricht etwa 50 kN/m^2 und entspricht dem Wert einer ca. 1 - 1,5 m hohen Trockenmauer. Auf einer Ferse wippend erreicht man etwa den zehnfachen Druck. So lässt sich die Tragfähigkeit der Bodenoberfläche z.B. für Trockenmauern, grob abschätzen. Diese Methode sagt allerdings nichts über die tiefer liegenden Bodenschichten aus. Hierfür müssen geotechnische Untersuchungen durchgeführt werden.

Daten zu Bemessungswerten des Sohldrucks und des Sohlwiderstandes
siehe DIN 1054:2010-12 und Tabelle 5.

Tabelle 2:**Durchschnittliche Bodenklassifikation und bodenmechanische Kenn- und Rechenwerte für die Böden im Raum Ludwigsburg**

Ohne Gewähr. Alle Angaben sind Anhaltswerte zur Orientierung.

Geologische Bezeichnung	Bodenklassen "alte DIN 18300" Die Homogenbereiche sind vom Gutachter festzulegen													
	Bodengruppen DIN 18196/ Verwitterungsgrad	Schrumpfgefahr	Frostempfindlichkeit F	Eignung zur Verfüllung	Eignung als Baugrund	Böschungswinkel Grad β Trennflächen beachten!	Steifemodul MN/m ² E _s	Kohäsion MN/m ² c'	Effektiver Reibungswinkel Grad ϕ'	Wichte feucht kN/m ³ γ'	Wichte unter Auftrieb kN/m ³ γ'	Überwiegende Konsistenzen		
Auffüllung heterogen, steinig, lehmig, tonig	w - st	15 - 20	10	20 - 30	0 - 5	3 - 5	45		oft 3 Schadstoffe!	selten Schadstoffe!	1 - 3	oft groß	GU GT TL TM UL	3 - 5
Einbaumaterial - Schotter, Kies, Siebschutt - bindige Böden	st - hf	15 - 20 20	11 11	32 - 45 20 - 30	0 35	50 - 200 5 - 20	45 45		2 2 - 3	ja nein	1 - 2 3	mittel groß		4 - 5
Lösslehm Löss	w - st st - hf	20 20	10	27,5 20 - 27	2 - 5 2 - 10	10 - 15 2 - 20	30-60		2 - 3 2	ja, steif	(2) - 3	groß	TL, TM UL, UM	3 - 5
Fließerde	st - hf	20	11	15 - 25	5 - 15	6 - 15	60		2	ja, steif	2 - 3	mittel	GU, TL, TM	4
Hanglehm	st - hf	19	9	21 - 25	0 - 10	4 - 7	60		2	ja, steif	2 - 3	mittel - groß	TL, TM	4 - 5
Hangschutt	st - hf	22	11	32 - 35	10	10 - 20 (40 - 60)	60		1 Stgr. 2	ja, steif	2	mittel	GU, TM	4 - 5
Talschutt	st	21	11	32	10	10 - 20	60		1 - 2 3 weich	ja, steif	3	mittel	GU	4 - 5
Auenlehm	w - st	19 - 20	10	22,5	0 - 5	1 - 7	45		2 - 3	ja, steif	2 - 3	groß	TA, TM, TL	2 - 4
Seeablagerung	w	14 - 18	4 - 8	15 - 20	0	1 - 3	-		3	nein	3	groß	OU, OT, TA TM	3 - 4
Torf, Schlick	w - br	11	1 - 3	15	5	0,4 - 2	-		nein	nein	2	groß	OU, OT	2 - 4
Neckarkies Kies, sandig, mitteldicht - dicht mögliche Schlicklinsen beachten	-	18 - 20	9 - 11	36	-	50 - 100	35		1 - 2	ja	1 - 2	keine	GW, IE	3 - 4
Gipskeupermergel - stark verwittert, ausgelaugt	w - st hf	20 - 22	11	22	10 - 20	10	60		2 - 3	ja, steif	3	groß	V3 - V4	4 - 5
Lettenkeuper Tonstein - stark verwittert - verwittert - angewittert - unverwittert	w - st st - hf hf - f f - h	20 20 20 - 23 23 - 24	10 10 13 15	22 - 25 25 25 - 30 35 - 40	5 - 15 15 - 25 15 - 35 35 - 40	5 - 10 6 - 15 10 - 80 > 100	60 60 70 80		3 2 - 3 1 - 2 1	selten selten ja ja	2 - 3 2 - 3 2 2 - 1	groß groß mtl-g keine	TM., TA, GU w2 - w4 V1 V0	4 4 - 5 5 - 6 6 - (7)

Fortsetzung Geologische Bezeichnung		Bodenklassen "alte DIN 18300" Die Homogenbereiche sind vom Gutachter festzulegen									
		Bodengruppen DIN 18196/ Verwitterungsgrad		Schrumpfgefahr		Frostempfindlich- keit F		Eignung zur Verfüllung		Eignung als Baugrund	
		TL, TM V3 - V4 V1 - V2 V0		4 - 5 4 - 5 6 - 7							
Lettenkeuper Dolomitstein, Sandstein - stark verwittert - angewittert - unverwittert	hf f h	21 22 24	11 12 15	25 25 35 -> 40	10 - 20 20 35 - 40	20 30 - 50 > 200	60 70 80	2 - 3 1 - 2 1	ja ja ja	3 1 1	mittel keine keine
Oberer Muschelkalk - Spalten und Karst - entfestigt, zerlegt, stark verwittert - gering – unverwittert und unverkarstet	- hf - f h	- 21 22 - 25	- 12 13 - 15	- 27,5 - 35 30 - 45	- 10 - 15 20 - 30	- 15 - 30 50 - 150	Vorsicht 60 80 Schicht- lagerung!	Sonder- gründung 2 - 3*	- ja ja	- 1 1	keine keine keine

Konsistenzen: w = weich st = steif hf = halbfest f = fest h = hart

Eignung als Baugrund: 1 = günstig 2 = durchschnittlich 3 = ungünstig

Frostempfindlichkeit: 1 = nicht-, 2 = gering -mittel-, 3 = sehr frostempfindlich

(nach ZTVE-StB 94)

Bodengruppe: G = Kies S = Sand U = Schluff T = Ton O = organisch H = Torf

W = weitgestuft E = enggestuft I = intermittierend gestuft

L = leichtplastisch M = mittelplastisch A = ausgeprägt plastisch

Verwitterungsgrad von Festgestein: V0 = frisch V1 = schwach verwittert

V2 = mäßig verwittert V3 = stark verwittert V4 = Vollständig verwittert V5 = zersetzt

(nach EN ISO 14689-1)

Bodenklassen: siehe Tabelle 3

Stgr.: Steingerüst

*: Ob. Muschelkalk ungünstig bei Verkarstung und Spaltenbildung

Daten zu Bemessungswerten des Sohlwiderstandes und des aufnehmbaren Sohldrucks sind von der Tiefe und Breite der Fundamente abhängig, siehe DIN 1054:2010-12 und Tab. 5.

Bodenart	kN/m ²
Angeschütteter, nicht künstlich verdichteter Boden	0 - 100
Gewachsene, offensichtlich unberührter Boden Schlamm, Moor, Torf, Mutterboden	0
Nicht bindige, ausreichend fest gelagerte Böden	
Fein bis Mittelsand	150 - 300
Grobsand bis Kies	200 - 500
Bindige Böden	
breiig: Schlamm	0
weich: Lehm feucht	50 - 100
steif: Lehm trocken	100 - 200
halbfest: Ton, Mergel	150 - 250
fest: Gips, Sandstein	300
Fels kompakt Kalk - Granit	2000 - 4000
Strassenbelag (Achtung: Trottoir Belastung < Strasse)	500 - 1000

Tabelle mit groben Anhaltswerten des Bemessungswerts des Sohlwiderstands $\sigma_{E,d}$

Verändert aus:

Die Bodenmechanik unter Turmdrehkrane und die Auswirkungen auf die Fundamente.

kran-info.ch / A. Bruderer,
Mai 2017.

Der Reibungswinkel ϕ im Boden ist abhängig von der...

Tabelle ergänzt nach: Skript - Boden und Baugrund. <https://e-construction-bbs.com/>

	weniger tragfähig	höher tragfähig
...Korngröße	Ton, Schluff, Sand	Kies
...Kornoberfläche	Kies	Schotter
...Kornform	plattig	kompakt
...Sieblinie	eng gestuft	weit gestuft

Tabelle 3: Alte Einteilung in Boden- und Felsklassen, DIN 18300-alt.

Klasse	Nach der neuen DIN 18300:2015-08 VOB ATV 2016 wird Boden in HOMOGENBEREICHE eingeteilt (siehe nächste Seite). Hier die alte Einteilung nach den Bodenklassen 1 - 7	Beispiele in Ludwigsburg (Anhaltswerte! Auf der Baustelle können Abweichungen vorkommen)	Böschungs-Winkel	Löse-Werkzeug
1	Oberboden Oberste Schicht des Bodens, die neben anorganischen Stoffen wie z.B. Kies-, Sand-, Schluff- und Tongemischen, auch Humus und Bodenlebewesen enthält. Dieser Boden muss bei Bauvorhaben abgeschoben, besonders geschützt gelagert und an anderer Stelle wieder eingebaut werden.	- Ackerboden und Humus.	-	Schaufel
2	Fließende Bodenarten Bodenarten, die von flüssiger bis breiiger Beschaffenheit sind und die das Wasser schwer abgeben. Hierzu gehören nach ZTVE- StB 94: Organische Böden der Gruppen HN, HZ und F. Feinkörnige Böden sowie organische Böden und solche mit organischen Beimengungen der Gruppen OU, OT, OH und OK, wenn sie brenige oder flüssige Konsistenz ($I_c = 0,5$) haben. Gemischtkörnige Böden der Gruppen SU, ST, GU und GT, wenn sie brenige oder flüssige Konsistenz haben.	- Schwemmllehm, nasser Schlick.	-	Schaufel, schwer
3	Leicht lösbare Bodenarten Nichtbindige bis schwachbindige Sande, Kiese und Sand-Kies-Gemische mit bis zu 15% Beimengungen an Schluff und Ton (Korngröße kleiner als 0,063 mm) und mit höchstens 30% Steinen von über 63 mm Korngröße bis zu $0,01 \text{ m}^3$ Rauminhalt ($0,01 \text{ m}^3$ Rauminhalt entspricht einer Kugel von einem Durchmesser von ca. 0,3 m. $0,1 \text{ m}^3$ Rauminhalt entspricht einer Kugel mit einem Durchmesser von ca. 0,6 m.) Organische Bodenarten mit geringem Wassergehalt, z.B. feste, trockene Torfe. Hierzu gehören nach ZTVE- StB 94: Grobkörnige Böden der Gruppen SW, SI, SE, GW, GI und GE. Gemischtkörnige Böden der Gruppen SU, ST, GU und GT. Torfe der Gruppen HN, soweit sie sich im Trockenen ausheben lassen und dabei standfest bleiben.	- Weicher bis steifer Auenlehm und Tallehm, weicher Schlick, nasser Neckarkies, schwachbindiger Sand. - Hangschutt - Auffüllungen haben BK 3 bis 6.	$30^\circ - 40^\circ$	Hacke, leicht
4	Mittelschwer lösbare Bodenarten Gemische von Sand, Kies, Schluff und Ton mit mehr als 15% Beimengungen an Schluff und Ton (Korngröße kleiner als 0,063 mm). Bindige Bodenarten von leichter bis mittlerer Plastizität (UL, UM, UA, TL, TM), die je nach Wassergehalt weich bis halbfest sind und die höchsten 30% Steine von über 63 mm Korngröße bis zu $0,01 \text{ m}^3$ Rauminhalt enthalten. Hierzu gehören nach ZTVE- StB 76: Feinkörnige Böden der Gruppen UL, UM, TL und TM. Gemischtkörnige Böden der Gruppen SU, ST, GU und GT.	- Steifer Auenlehm. - Lösslehm, Löss, Fließerde, Hanglehm, Hangschutt, Seeablagerung (Seetone) – jeweils weich bis halbfest, Neckarkies. - Gipskeuper ausgelaugt, verwittert und halbfest. - Lettenkeuper-Tone (Tonmergel) verwittert und halbfest. - Auffüllungsgemische aus Schluff, Sand, Kies.	bis 40°	Hacke, normal
5	Schwer lösbare Bodenarten Bodenarten nach den Klassen 3 und 4, jedoch mit mehr als 30% Steinen von über 63 mm Korngröße bis zu $0,01 \text{ m}^3$ Rauminhalt. Nichtbindige und bindige Bodenarten mit höchstens 30% Steinen von über $0,01 \text{ m}^3$ bis $0,1 \text{ m}^3$ Rauminhalt. Ausgeprägt plastische Tone (TA) und Tone mit organischen Beimengungen (OT), die je nach Wassergehalt weich bis halbfest sind.	- Hangschutt, Hanglehm (BK 3 bis 6), selten Lösslehm. - Seeablagerungen (TA, OT). - Gipskeuper angewittert und fest. - Lettenkeuper-Tonsteine und Karbonatsteine, angewittert und fest. - Ob. Muschelkalk stark verwittert, entfestigt bis zerstört.	bis 60°	Hacke, schwer
6	Leicht lösbarer Fels Felsarten, die einen inneren, mineralisch gebundenen Zusammenhalt haben, jedoch stark klüftig, brüchig, bröckelig, schiefbrig, weich oder verwittert sind, sowie vergleichbare feste oder verfestigte bindige oder nichtbindige Bodenarten, z.B. durch Austrocknung, Gefrieren, chemische Bindungen. Nichtbindige und bindige Bodenarten mit mehr als 30% Steinen von über $0,01 \text{ m}^3$ bis $0,1 \text{ m}^3$ Rauminhalt.	- Gipskeuper angewittert bis unverwittert und fest bis hart. - Lettenkeuper: Tonsteine angewittert bis unverwittert und fest bis hart. Karbonatsteine angewittert bis unverwittert, dünnbankig, geklüftet und hart. Sandsteine angewittert bis verwittert, geklüftet und fest bis hart. - Ob. Muschelkalk gering verwittert bis verwittert, eng geklüftet und dünnbankig oder entfestigt.	$70^\circ - 80^\circ$ (Raumstellung der Trennflächen - beachten)	Spitzhacke, Reißwerkzeug, gelegentlich Meißel
7	Schwer lösbarer Fels Felsarten, die einen inneren, mineralisch gebundenen Zusammenhalt und hohe Gefügefesteitigkeit haben, und die nur wenig klüftig oder verwittert sind. Festgelagerter, unverwitterter Tonschiefer, Nagelfluhschichten, verfestigte Schlackenhalden der Hüttenwerke und dergleichen. Steine oder Kluftkörper von über $0,1 \text{ m}^3$ Rauminhalt (z.B. $0,5 \times 0,5 \times 0,4 \text{ m}$).	- Lettenkeuper: Mächtige Bänke aus Karbonatsteinen, Tonsteinen und Sandsteinen. Angewittert bis unverwittert und dickbankig mit großen Kluftabständen (selten!). - Ob. Muschelkalk angewittert bis unverwittert und dickbankig. - Steine oder Kluftkörper von über $0,1 \text{ m}^3$ Rauminhalt, - Trennflächenabstand > 1 m.	bis 80° (Raumstellung der Trennflächen - beachten)	Reißen, Meißeln, Bohren, Sprengen

Neue Einteilung der Böden in Homogenbereiche
VOB 2012, Ergänzungsband 2015, Teil C, DIN 18300:2015-08 "Erdarbeiten"

Mit Erscheinen des Ergänzungsbandes zur VOB – im September 2015 – wurde das System der **Klassifikation /Beschreibung von Böden nach VOB/C ATV DIN 18300 "Erdarbeiten"**, DIN 18301 "Bohrarbeiten", DIN 18319 "Rohrvortriebsarbeiten" und einiger anderer Normen (DIN 18311, 18312, 18321) grundlegend geändert. Betroffen sind daher alle Baumaßnahmen im Hoch- und Tiefbau und die daran Beteiligten. Die "**Bodenklassen nach DIN 18300-alt**" und anderer Normen werden durch sog. "**Homogenbereiche**" ersetzt, für die jeweils dann ein Preis abzugeben ist.

Alte Regelung – Bodenklassen

In den alten Versionen der Normen waren teils sehr unterschiedliche Klassifikationen für Boden und Felsklassen eingeführt. Am bekanntesten sind die Bodenklassen nach

DIN 18300-alt: Bodenklassen 1 "Oberboden" bis Bodenklasse 7 "Schwer lösbarer Fels".

Neue Regelung – Homogenbereiche

In ATV DIN 18304 (2012) wird ein Homogenbereich wie folgt definiert:

Ein Homogenbereich ist ein räumlich begrenzter Bereich aus einer oder mehreren Boden- und Felsenschichten nach DIN 4020-2010 und DIN EN 1997-2, dessen bautechnische Eigenschaften eine definierte Streuung aufweisen und der sich von den Eigenschaften der abgegrenzten Bereiche abhebt. Ggf. vorhandene umwelttechnische Parameter sind bei der Einteilung zu berücksichtigen.

Der geotechnische Gutachter benennt für das Projekt eine "Geotechnische Kategorie" (GK 1 - 3) nach DIN 4020-2010. Die genauere Beschreibung der einzelnen Bodenschichten, die dann entweder auch jeweils einen Homogenbereich darstellen können, oder vom Gutachter zu Homogenbereichen zusammengefasst werden können, erfordert einen Mehraufwand bei der Probennahme, eventuell durch zusätzliche Bohrungen und bei der bodenmechanischen Analytik. Es können Mehrkosten von über 100 Euro pro Bodenschicht erwartet werden oder etwa 15 - 20 % mehr, als bei bisherigen Gutachten. Für die GK1 ist in DIN 18300 und 18320 eine vereinfachte Form der Beschreibung der Homogenbereiche möglich.

Auswirkungen auf die Praxis des Planers

Aus der Neufassung der DIN 18300 "Erdarbeiten" ergeben sich somit neue Anforderungen für Auftraggeber und Auftragnehmer, um Erdarbeiten sach- und fachgerecht nach neuer Systematik zu beschreiben und zu kalkulieren. Die Einteilung in die Homogenbereiche ist Inhalt des Geotechnischen Berichts. In den Leistungsverzeichnissen sind je Homogenbereich LV-Positionen aufzunehmen. Ob es sinnvoll ist mehrere Homogenbereiche in einer LV-Position zusammenzufassen wird die Praxis zeigen. Der Umfang der Leistungsverzeichnisse wird sich erhöhen. Es wird, soweit das derzeit absehbar ist notwendig, je Homogenbereich des jeweiligen Gewerks einzelne Positionen auszuschreiben. Die Bauüberwachung/Abrechnung hängt in hohem Maße von der sinnvollen Einteilung der Homogenbereiche durch den Gutachter ab. Für den Bauüberwacher muss es möglich sein, ohne vertiefende bodenmechanische Kenntnisse Homogenbereiche zu unterscheiden. Bei komplizierten Verhältnissen wird wohl auch in der Bauüberwachung/Abrechnung der Baugrundgutachter einzubeziehen sein. Die VOB-Ergänzung ist seit September 2015 gültig und übergangsweise konnte die alte DIN 18300 angewendet werden. Bis heute werden in Gutachten neben den Homogenbereichen manchmal auch noch die alten Boden- und Felsklassen angegeben.

Beispiel

Geologischer Aufbau, Schichtnummer	Altes System Bodenklassen qualitativ	Neues System Homogenbereiche quantitativ
1) Auffüllung steinig, bindig, inhomogen	2 - 4	A oder I
2) Quartäre Schliffe und Kiese bindig, sandig	3 - 4	B oder II
3) Lettenkeuper, Tonstein angewittert und fest	5 - 6	C oder III

Beispiel aus einem geotechnischen Gutachten zum BV "Mess- und Drosselschacht für Abwasser" in Ludwigsburg, Marbacher Straße im Bereich des Tälesbachs.

Gutachter: E. Marx, Geotechnik-Südwest, Bietigheim/B., 2017.

Im vorliegenden Fall werden drei Homogenbereiche differenziert:

Homogenbereich A Künstliche Auffüllungen, steinig-bindig

Homogenbereich B Steinige Hanglehmböden und verwitterter Muschelkalk

Homogenbereich C angewitterter / unverwitterter Muschelkalk, steinig/felsig

Tabelle 4: Homogenbereiche A + B für Böden nach DIN 18 300:2015-08

Nr.	Bodenart	Homogenbereich A	Homogenbereich B
1	Korngrößenverteilung	n.b.	n.b.
2a	Anteil Steine > 63 mm	n.b.	n.b.
2b	Anteil Blöcke > 200 mm	n.b.	n.b.
2c	Anteil große Blöcke > 630 mm	n.b.	n.b.
3	mineralogische Zusammensetzung der Blöcke	n.e.	n.e.
4	Wichte	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 19,5 - 20,5 \text{ kN/m}^3$
5	Kohäsion	$c' = 2 - 5 \text{ kN/m}^2$	$c' = 5 - 15 \text{ kN/m}^2$
6	Undrainierte Scherfestigkeit	$c_u = 20 - 30 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 40 - 50 \text{ kN/m}^2$
7	Sensitivität	n.e.	n.e.
8	Wassergehalte	ca. 15 – 20 %	ca. 10 – 15 %
9	Konsistenz	steif / halbfest	steif / halbfest

10	Konsistenzzahl	ca. $I_c = 0,8 - 1,0$	ca. $I_c = 0,9 - 1,2$
11	Plastizität	n.b.	n.b.
12	Plastizitätszahl	n.b.	n.b.
13	Durchlässigkeit	n.b.	ca. $10^{-5} - 10^{-7} \text{ m/s}$ *
14	Lagerungsdichte	locker	mitteldicht
15	Kalkgehalt	n.b.	n.b.
16	Sulfatgehalt	n.b.	n.b.
17	Organischer Anteil	nicht vorhanden	nicht vorhanden
18	Benennung org. Böden	---	---
19	Abrasivität	n.e.	n.e.
20	Bodengruppe	GU, TM, TL	GU / GU* / GX
21	Ortsübliche Bezeichnung	Künstliche Auffüllung + verwitterter Muschelkalk	

n.e. nicht erforderlich, n.b. nicht bestimmbar, * Erfahrungswerte

Tabelle 5: Homogenbereich C für Fels / felsartige Böden (DIN 18300:2015-08)

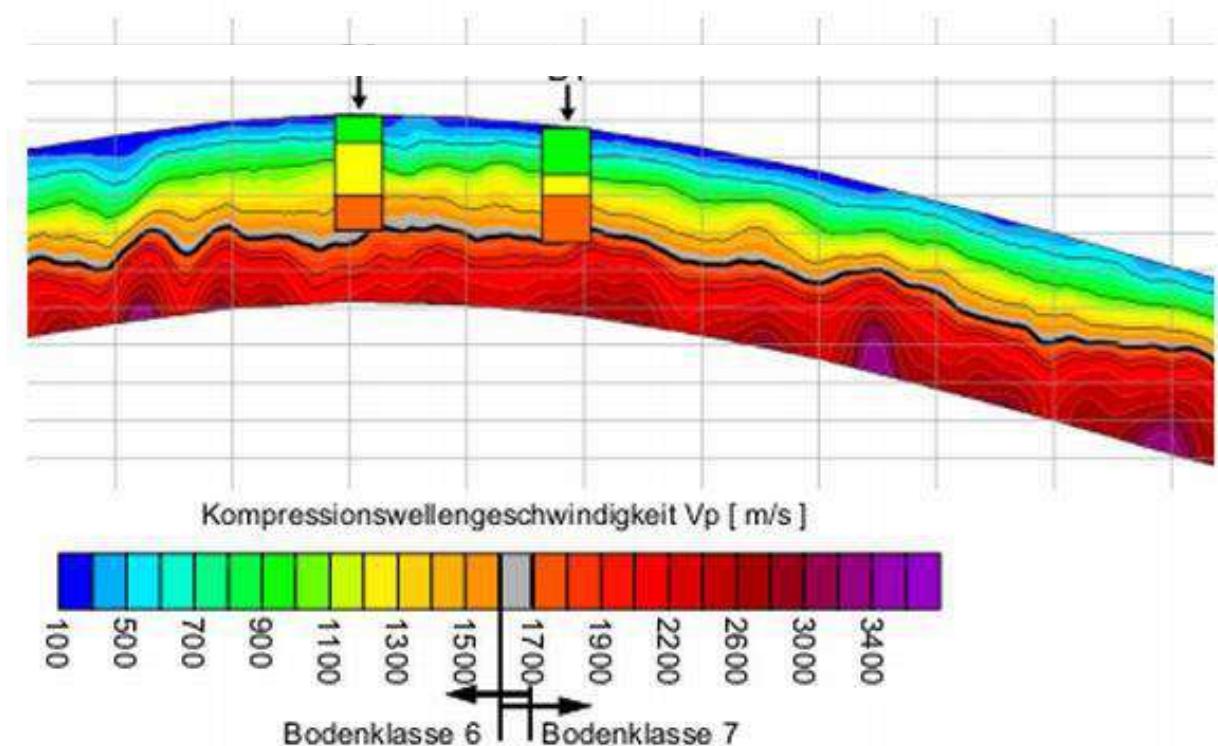
Nr.	Bodenart	Homogenbereich C angewitterter Muschelkalk
1	Benennung von Fels	Kalk- und Dolomitstein, evtl. stark verwittert in Wechsellagerung mit Mergelschichten
2	Wichte	$\gamma = 22 - 25 \text{ kN/m}^3$ *
3	Verwitterung/Veränderung	n.b.
4	Einaxiale Druckfestigkeit	n.b.
5	Bodengruppe	GX, Kst, Dst
6	Ortsübliche Bezeichnung	Muschelkalk, angewittert

n.b. nicht bestimmbar * Erfahrungswerte

Böden des Homogenbereiches C (Fels und felsartige Böden) lassen sich nur mit geeigneten Geräten (z.B. Reißzähne, Meißel etc.) lösen und weichen somit klar von den Homogenbereichen A + B ab.

Refraktionsseismik zur Unterscheidung von BK6 und BK 7

Bei der Erstellung von Geländeeinschnitten im Locker- und Festgestein (z.B. beim Straßenbau) ist für die Planung des Geräteeinsatzes und der Massenbestimmung eine Unterscheidung der Bodenklassen 6 (leicht lösbar) und 7 (schwer lösbar) erforderlich. Refraktionsseismische Messungen mit engem Geophon- und Anregungspunktabstand und eine tomographische Auswertung der ermittelten Laufzeiten ermöglichen diese Unterscheidung der Bodenklassen. Das Ergebnis des Verfahrens ist ein Tiefenschnitt entlang des jeweiligen Profils, der die Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten enthält. Die ermittelte Geschwindigkeitsverteilung lässt Rückschlüsse auf die Gesteinsart im Untergrund zu. Die Einteilung des Untergrundes in Bodenklassen erfolgt durch den Parameter der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kompressionswellen. Bei gleichzeitiger Bestimmung von Scherwellengeschwindigkeiten und Dichten ließen sich auch elastische Moduln bestimmen. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt (Länge 150 m, Tiefe unter Geländeoberfläche 10 m) des aus der refraktionsseismischen Auswertung erhaltenen Geschwindigkeits-Tiefenmodells. Auf dem Profil ist generell ein Anstieg der Geschwindigkeit mit der Tiefe zu erkennen, der auf eine zunehmende Verfestigung des Bodens bzw. des Felsen zurückzuführen ist. Deutlich lässt sich der Bereich des Lockergesteins (Mutterboden, Schluff, Kies) mit Geschwindigkeiten bis ca. 600 m/s abgrenzen. Der größte Anstieg der Geschwindigkeit kennzeichnet den Übergangsbereich vom Lockergestein zum Fels. Im Fels selbst steigt die Geschwindigkeit relativ gleichmäßig an, was die Veränderung des Verwitterungsgrads (entfestigt - zersetzt bis angewittert) repräsentiert. Aufgrund der Bohrungsergebnisse und in Anlehnung an die ZTVE-StB 94 wurden Geschwindigkeitswerte größer als 1700 m/s der Bodenkasse 7 zugeordnet.



Bodenklasseneinteilung für Schieferton/Tonschiefer nach Floss (2004)

Tabelle 4
Felsarten nach DIN EN ISO 14689-1, Tab. A.1

Gruppe	Magmatisches Gestein					Sedimentgestein			Metamorphes Gestein			
Untergruppe					pyro-klastisch	klastisch		chemisch/organisch				
Gefüge	regellos					geschichtet			geschiefer	regellos		
Zusammensetzung	Quarz, Feldspäte, Glimmer, dunkle Minerale sauer	Feldspäte dunkle Minerale intermediär	dunkle Minerale basisch	dunkle Minerale ultrabas.	mind. 50% magmatisch	Gesteinskörper	mind. 50 % Karbonat	Salze, Karbonate, quarzitisch kohlig	Quarz, Feldspat, Glimmer, dunkle Minerale	Quarz, Feldspat, Glimmer, dunkle Minerale, Karbonate		
Korngröße [mm]	Pegmatit			Pyroxenit	runde Körner: Agglomerat	runde Korner: Konglomerat	Kalk-Rudit	Salzgestein	tektonische Brekzie			
	grob-körnig ≥2	Granit	Diorit		eckige Körner: vulkan. Brekzie	eckige Körner: Brekzie			Migmatit			
					Tuff	Sandstein	Kalk-Arenit		Gneis	Hornfels		
	mittel-körnig ≥0,63	Rhyolith	Andesit	Dolerit	Peridotit	fein-körniger Tuff	Schluff-Tonstein	Kalkstein Dolomit	Marmor	Marmor		
	fein-körnig ≥0,063			Basalt		sehr fein-körniger Tuff				Granulit		
	sehr fein-körnig ≥0,002	Rhyolith	Andesit	Basalt		Tonstein > 50 % sehr feinkörnig	Mergelstein	Kreide	Amphibolit	Quarzit		
	glasig									Phyllit		
	Vulkanisches Glas								Tonschiefer			
									Mylonit			

Tabelle 5:**Bemessungswerte des Sohlwiderstands (zul. $\sigma_{R,d}$ in kN/m²) in Wechselwirkung mit dem Bauwerk und Baugrund nach DIN 1054:2010-12.**

Ergänzt aus: H. Prinz & R. Strauß, Ingenieurgeologie, 2018.

Bei einfachen Bauwerken und bekannten Untergrundverhältnissen kann der Bemessungswert des Sohlwiderstandes (ehem. zulässige Sohldruckspannung) nach den Tabellenwerten festgelegt werden, wenn...

- die Geländeoberfläche und die Fundamentsohle waagrecht sind,
- der Baugrund bis in 2-fache Fundamentbreite, mindestens aber 2 m unter Gründungssohle ausreichend tragfähig ist und kein nennenswerter Porenwasserdruck auftritt,
- die Sohldruckbeanspruchung senkrecht ist.

Die einwirkende Sohldruckspannung muss kleiner oder gleich dem Bemessungswert des Grundbruchwiderstands ($\sigma_{E,d} \leq \sigma_{R,d}$).

Die angegebenen Werte sind keine aufnehmbaren Sohldrücke nach DIN 1054:2005-01 und keine zulässigen Bodenpressungen nach DIN 1054:1976-11. ($q_{u,k}$ = mittlere einaxiale Druckfestigkeit)

nichtbindiger Baugrund	Einbindetiefe	Streifenfundamente mit Breiten von				
		0,5 m	1 m	1,5 m	2 m	3 m
<i>Setzungsempfindliche Bauwerke (Begrenzung der Setzungen)</i>						
Kies und Sand dicht GE, GW, SE, SW, SI GU, SU, GT (DIN 1054-101 Tab. A 6.1 und A 6.2)	0,5 m	280	420	460	390	310 kN/m ²
	1,0 m	380	520	500	430	340
	1,5 m	480	620	550	480	360
	2,0 m	560	700	590	500	390
<i>Setzungsunempfindliche Bauwerke (auf Basis Grundbruchsicherheit)</i>						
	0,5 m	280	420	560	700	700
	1,0 m	380	520	660	800	800
	1,5 m	480	620	760	900	900
	2,0 m	560	700	840	980	980
bindiger Baugrund	Einbindetiefe	Streifenfundamente mit Breiten von ≤ 2 m steif – halbfest				
Schluff UL (DIN 1054-101 Tab. A 6.5)	0,5 m	180				–
	1,0 m	250				–
	1,5 m	310				–
	2,0 m	350				–
	Einbindetiefe	steif $q_{u,k} = 120\text{--}300 \text{ kN/m}^2$	halbfest $q_{u,k} = 300\text{--}700 \text{ kN/m}^2$	fest $q_{u,k} > 700 \text{ kN/m}^2$		
Kies und Sand schluffig- tonig GU*, SU*, ST, GT*, ST* (DIN 1054- 101, Tab. A 6.6)	0,5 m	210	310	460		
	1,0 m	250	390	530		
	1,5 m	310	460	620		
	2,0 m	350	520	700		
Schluff + Ton UM, TL, TM (DIN 1054-101 Tab. A 6.7)	0,5 m	170	240	390		
	1,0 m	290	290	450		
	1,5 m	220	350	500		
	2,0 m	250	390	560		
Ton TA (DIN 1054-101 Tab. A 6.8)	0,5 m	130	200	280		
	1,0 m	150	250	340		
	1,5 m	180	290	380		
	2,0 m	210	320	420		

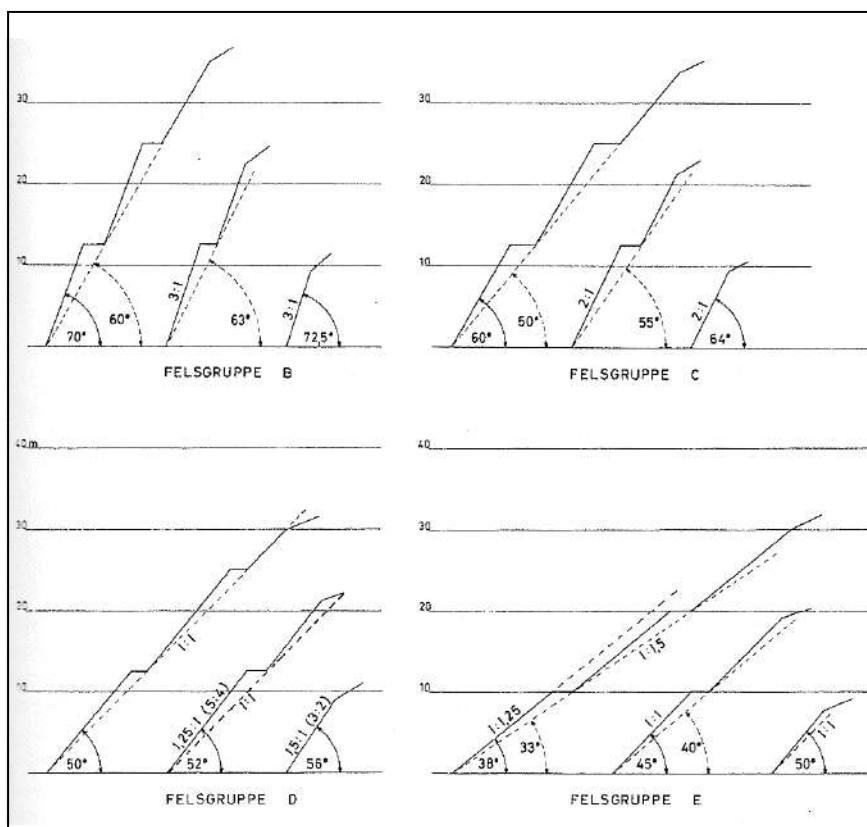
Tabelle 6:
Anhaltswerte für Böschungsneigungen bei Lockergesteinen.
Nach: H. Prinz & R. Strauß, Ingenieurgeologie, 2018.

Bodenart	Bodengruppen nach DIN 18196	Böschungshöhe h	Böschungsneigung
Grobkörnige Böden	GW, GI, SW, SI	< 10 m > 10 m	1 : 1,5 1 : 1,5 – 1,8
	GE, SE	< 10 m > 10 m	1 : 1,8 1 : 1,8 – 2,0
Feinkörnige, bindige Böden	UL, UM, TL	< 6 m > 6 m	1 : 1,5 1 : 1,5 – 1,2
	GU, GT	< 10 m > 10 m	1 : 1,5 1 : 1,5 – 1,8
Gemischtkörnige Böden	GU*, GT*, SU, ST, SU*, ST*	< 6 m	1 : 1,25 – 1,5
	* = 15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,063 mm	6 > h < 9 m	1 : 1,5 – 1,8
	* = stark	9 > h < 15 m	1 : 1,8 – 2,0

- Grobkörnige Böden:** ...sollten frei von Sickerwasserzutritt sein, keine bindigen Zwischenlagen.
- Bindige Böden:** ...sollten homogen, leicht-mittelplastisch, mindestens steifplastisch, ohne einfallende Schicht- oder Kluftflächen und ohne Wasserzutritt sein. TM- und TA-Böden, sollten nicht steiler als 1 : 2 geböscht werden.
- Gemischtkörnige Böden:** Wasserführende Schichten und ausgeprägte Schichtflächen sind besonders zu beachten.
- Heterogen Böden:** Bindige Böden mit grobkörnigen Zwischenlagen können wie feinkörnige Böden geböscht werden.
- Vorsicht** bei mehrfachem Wechsel im Bodenaufbau, bei Wasserführung, bei Schichtneigung, bei ungünstigen Kluftflächen.
- Halden- und Kippenböden:** Die Standsicherheit von Halden- und Kippenböden erfordert einen besonderen Untersuchungsaufwand mit einer Recherche der Ablagerungsbedingungen.

Tabelle 6a:
Anhaltswerte für Böschungsneigungen bei Felsgesteinen

Grafik und Text aus: H. Prinz & R. Strauß, Ingenieurgeologie, 2018.



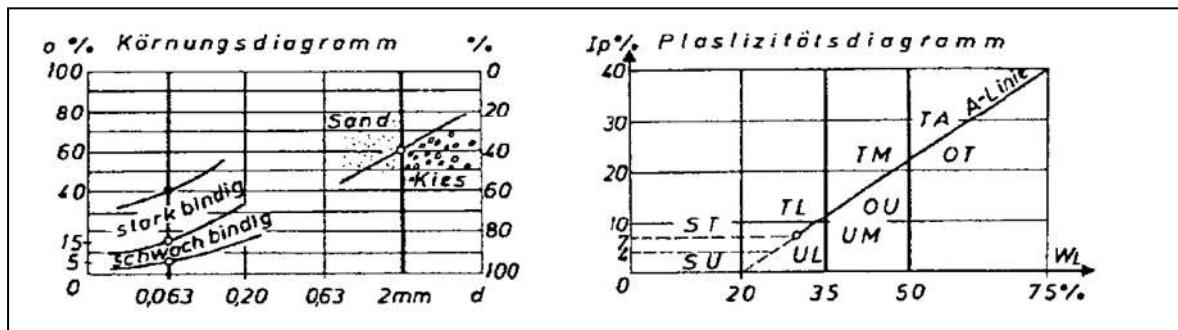
Unter die Gruppe B fallen unverwitterte, wenig geklüftete Tiefen- und Ergussgesteine wie Granit, Diabas, Basalt sowie dickbankige harte Sedimentgesteine wie Kalkstein, Dolomit, Sandstein und Grauwacken ohne die Standfestigkeit abmindernde mergelig-tonige Zwischenlagen.

Zur Gruppe C gehören die Gesteine der Gruppe B mit leichter Anwitterung bzw. mittelständiger Klüftung und einzelnen tonig-mergeligen Zwischenlagen sowie verwitterungsbeständige sandige Tonschiefer.

In die Gruppe D sind stärker angewitterte und geklüftete Gesteine der Gruppen B und C sowie Wechsellagerungen von festen, einigermaßen frostbeständigen Sedimentgesteinen zu stellen. Schmale Störungs- und Zerrüttungszonen müssen notfalls besonders gesichert werden. Breite Störungszonen bedürfen oft einer Abflachung und Ausrundung der Böschungen.

In Gruppe E sind milde Tonschiefer, Wechsellagerungen von Sand- oder Kalksteinen mit frostempfindlichen Ton- und Mergelsteinen und ähnliche Gesteinsserien zu stellen. Dickere, harte und frostbeständige Bänke können dabei als Klippen herausgearbeitet werden. Böschungen in entfestigten, stark verwitterten Tonsteinen oder Tonschiefern neigen sehr stark zu Oberflächenrutschungen und sollten wie hochplastische Lockergesteine behandelt werden.

Tabelle 7:
Übersicht Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke nach DIN 18196:2011-05
aus H. Prinz & R. Strauß (2018).



Zeichen	Bodengruppe	Definition Körnung, Plastizität, Stoffwerte	Hauptgruppen	Verhalten	
GE	Kies enggestuft	$C_u \leq 6, C_c < 1$	> 40 % > 2 mm	grobkörnig	
GW	Kies weitgestuft	$C_u > 6, C_c = 1-3$	< 5 % < 0,063 mm	nichtbindig (rollig)	
GI	Kies intermittierend	Fehlkörnung vorh.			
SE	Sand enggestuft	$C_u < 6, C_c < 1$	> 40 % < 2 mm		
SW	Sand weitgestuft	$C_u > 6, C_c = 1-3$	< 5 % < 0,063 mm		
SI	Sand intermittierend	Fehlkörnung vorh.			
GU	Kies schluffig	5-15 % < 0,063 mm	> 40 % > 2 mm	gemischt-körnig	
SU	Sand schluffig	Feinkorn schluffig	≤		
GT	Kies tonig	5-15 % < 0,063 mm	> 40 % > 2 mm		
ST	Sand tonig	Feinkorn tonig	≤	bindig	
GU*	Kies stark schluffig	15-40 % < 0,063 mm	> 40 % > 2 mm		
SU*	Sand stark schluffig	Feinkorn schluffig	≤		
GT*	Kies stark tonig	15-40 % < 0,063 mm	> 40 % > 2 mm		
ST*	Sand stark tonig	Feinkorn tonig	≤		
UL	Schluff leicht plastisch	$w_L < 35\%$	$I_p < 4\%$ oder unter A-Linie	feinkörnig	
UM	Schluff mittel plastisch	$w_L = 35-50\%$			
TL	Ton leicht plastisch	$w_L < 35\%$	$I_p < 7\%$ und über A-Linie		
TM	Ton mittel plastisch	$w_L = 35-50\%$			
TA	Ton ausgeprägt plastisch	$w_L < 50\%$			
OU	organischer Schluff	$w_L = 35-50\%$	$I_p < 7\%$ und unter A-Linie	organogen	organisch
OT	organischer Ton	$w_L < 50\%$			
OH	humoser Boden	$V_{gl} < 20\% \text{ pflanzl.}$	Körnung ≤ 40 % ≤ 0,063 mm		
OK	kalkig-kieseliger Boden	$V_{Ca} < 10\% \text{ porös}$			
HN	Torf nicht zersetzt	$V_{gl} < 30\% \text{ faserig}$	Bräunlich	organisch	
HZ	Torf zersetzt	$V_{gl} < 30\% \text{ schmierig}$	schwärmlich		
F	Mudde (Faulschlamm)	$V_{gl} < 30\% \text{ federnd}$	schwammig		
[–]	Auffüllung	aus natürlichen Böden	[G, S, U, T, H, F]	Auffüllung	–
A	Auffüllung	aus Fremdstoffen	Müll, Schutt		

a = Anteil d = Korndurchmesser I_p = Plastizitätszahl w_L = Wassergehalt an der Fließgrenze
U (Cu) = Ungleichförmigkeit C = Kompressionsbeiwert
G = Kies S = Sand U = Schluff T = Ton O = organische Beimengung H = Torf F = Mudde, Faulschlamm
K = Kalk N = nicht/wenig zersetzer Torf Z = zersetzer Torf
W = weitgestufter - , E = enggestufter - , I = intermittierend gestufter Kornverteilung
L = leicht plastisch M = mittel plastisch A = ausgeprägt plastisch
 V_{gl} = organische Bestandteile V_{Ca} = Kalkgehalt
* = stark z.B. SU* = Sand, stark schluffig

1	2	3	4	5
Benennung	Kurzzeichen	Zeichen	Farbkennzeichnung	
			Farbname	Farbzeichen nach DIN 6164 Teil 1
Mutterboden	Mu		gelblichbraun	4 : 5 : 3
Verwitterungslehm, Hanglehm	L		grau	N : 0 : 5,5
Hangschutt	Lx		grau	N : 0 : 5,5
Geschiebelehm	Lg		grau	N : 0 : 5,5
Geschiebemergel	Mg		violettblau	15 : 6 : 4
Löß	Lö		oliv	1 : 4 : 5
Lößlehm	Löl		oliv	1 : 4 : 5
Klei, Schlick	Kl		lila	11 : 4 : 4
Wiesenkalk, Seekalk, Seekreide, Kalkmudde	Wk		hellblau	17 : 5 : 2
Bänderton	Bt		violett	14 : 5 : 4
Mudde (Faulschlamm)	F		lila	11 : 4 : 4
Auffüllung	A		-	-
Kreidestein	Krst		hellblau	17 : 5 : 2
Kalktuff	Ktst		hellblau	17 : 5 : 2

8a: Kurzformen, Zeichen und Farbkennzeichnungen für gebräuchliche nichtpetrographische Bezeichnungen von Boden und Fels.

1	2	3	4	5
Benennung	Kurzzeichen	Zeichen	Farbkennzeichnung	
			Farbname	Farbzeichen nach DIN 6164 Teil 1
Konglomerat	Ko		gelb	2 : 6 : 1
Brekzie	Br		gelb	2 : 6 : 1
Sandstein	Sst		orange	6 : 6 : 2
Schluffstein	Ust		oliv	1 : 4 : 5
Tonstein	Tst		violett	14 : 5 : 4
Mergelstein	Mst		violettblau	15 : 6 : 4
Kalkstein	Kst		dunkelblau	17 : 5 : 4
Dolomitstein	Dst		dunkelblau	17 : 5 : 4
Anhydrit	Ahst		gelbgrün	23 : 6 : 3
Gips	Gyst		gelbgrün	23 : 6 : 3
Salzgestein	Sast		gelbgrün	23 : 6 : 3
Verfestigte vulkanische Aschen (Tuffstein)	Vst		grau	N : 0 : 5,5
Steinkohle	Stk		dunkelbraun	5 : 2 : 6
Quarzit	Q		rosa	9 : 3 : 2
Vulkanit (z.B. Basalt)	Vu		rot	8 : 7 : 2
Plutonit (z.B. Granit)	Pl		rot	8 : 7 : 2
Massige Metamorphe	Mem		rot	8 : 7 : 2
Blättrige, feinschichtige Metamorphe (Glimmerschiefer, Phyllit)	Meb		violett	14 : 5 : 4

8b: Kurzformen, Zeichen und Farbkennzeichnungen für Felsarten.

Tabellen 8:
Auszug aus DIN 4023:2006-02, Kurzzeichen und Farbkennzeichnungen für Bodenarten und Fels für die Säulendarstellung von Bohrungen, Sondierungen und Schürfen
 Quelle: Katzenbach, R. (2013): Studienunterlagen Geotechnik. – Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt.

Zeichen	Benennung
Proben	
A2	Probe Nr. 2, entnommen mit einem Verfahren der Entnahmekategorie A z.B. aus 19,0 m Tiefe = NN + 352,1 m
B1	Probe Nr. 1, entnommen mit einem Verfahren der Entnahmekategorie B z.B. aus 5,2 m Tiefe = NN + 114,8 m für Untersuchungen ausgewählt
C1	Probe Nr. 1, entnommen mit einem Verfahren der Entnahmekategorie C z.B. aus 15,5 m Tiefe = NN + 475,7 m
W8	Wasserprobe Nr. 8 z.B. aus 11,9 m Tiefe = NN + 56,9 m
	gekernte Strecke
Angaben zum Grundwasser	
8,9 (2003-09-20)	Grundwasseroberfläche (beim Aufschluss angetroffen) z.B. am 20.09.2003 in 8,9 m unter Gelände angebohrt
8,9 (2003-09-20)	Grundwasserstand nach Beendigung der Bohrung oder bei Änderung des Wasserspiegels nach seinem Antreffen jeweils mit Angaben der Zeitdifferenz in Stunden (z.B. 3 h) nach Einstellen der Ruhe z.B. am 20.09.2003 in 8,9 m unter Gelände angebohrt
NN+118,0 2003-05-10	Ruhewasserstand z.B. am 10.05.2003 bei NN + 118,0 m in einer Grundwassermessstelle
NN+365,7 (2003-05-10) 10 ^h NN+355,7	Grundwasseranstieg während oder nach der Aufschlusstätigkeit z.B. am 10.05.2003 Grundwasser in 15,8 m unter Gelände = NN + 355,7 m angebohrt, Anstieg des Wassers bis 5,8 m unter Gelände = NN + 365,7 nach 10 Stunden
NN+11,7 (2003-05-10) 	Wasser versickert z.B. am 10.04.2003 in NN + 11,7 m
Angaben zum Trennflächengefüge	
	Fallrichtung und Fallen von Trennflächen z.B. 25° nach SE: 135/25

8c: Zeichen für einige wichtige Eigenschaften, die links der Säule eingetragen werden

Benennung	Zeichen
nass (Verwässerungszone oberhalb des Grundwassers)	
klüftig	
Konsistenz feinkörniger Böden	
breiig	
weich	
steif	
halbfest	
fest	
Lagerungsdicht grobkörniger Böden ^a	
locker bis sehr locker	
mitteldicht	
dicht	
sehr dicht	
Verwitterungsstufen nach DIN EN ISO 14689-1	
frisch (Stufe 0)	
schwach verwittert (Stufe 1)	
mäßig bis stark verwittert (Stufe 2 bis 3)	
vollständig verwittert (Stufe 4)	

^a Nicht direkt aus dem Bohrvorgang bestimmbar.

8d: Zeichen für einige bautechnische wichtige Eigenschaften, die rechts der Säule eingetragen werden.

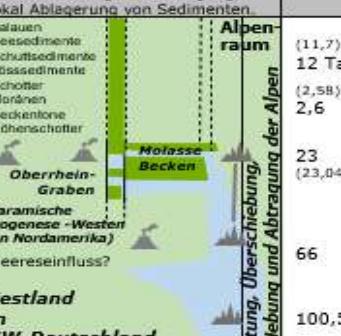
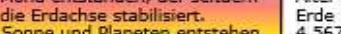


Kurzzeichen und Zeichen für Bodengruppen und Eigenschaften nach DIN 4023 und DIN 18 196

Bodenart	Beimengungen			Bodengruppe		
Kies	G	kiesig	g	enggestufte Kiese		
Grobkies	gG	grobkiesig	gg	weitgestufte Kies-Sand-Gemische		
Mittellkies	mG	mittellkiesig	mg	intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische		
Feinkies	fG	feinkiesig	fg			
Sand	S	sandig	s	enggestufte Sande		
Grobsand	gS	grobsandig	gs	weitgestufte Sand-Kies-Gemische		
Mittelsand	ms	mittelsandig	ms	intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische		
Feinsand	fS	feinsandig	fs			
Schluff	U	schluffig	u	Kies-Schluff-Gemische		
Ton	T	tonig	t	GT bzw. GT ^{x)}		
Torf, Humus	H	torfig, humos	h	Sand-Schluff-Gemische		
Mudde	M	org. Beimengungen	o	Sand-Ton-Gemische		
Auffüllung	A			Sand-Schluff-Gemische ohne Plastizität		
Mutterboden	Mu	z.B.		Für Querbalken gilt auch *-Symbol		
Geschiebelehm	Lg	schwach grobsandig	gs'	z.B. SU = SU*		
Geschiebemergel	Mg	stark mittelsandig	ms			
Löß	Lö			leicht plastische Schluffe		
Lößlehm	Löl			mittelplastische Schluffe		
Wiesenkalk, Seekalk,				ausgeprägt plastische Schluffe		
Seekreide,				leicht plastische Tone		
Kalkmudde	Wk			mittelplastische Tone		
				ausgeprägt plastische Tone		
Farbe						
grau	(g)	grün	(ü)	bunt	(u)	Schluffe mit organischen Beimengungen
braun	(b)	blau	(a)	hell	(h)	Tone mit organischen Beimengungen
rot	(r)	schwarz	(s)	dunkel	(d)	groß- bis gemischtkörnige Böden mit Beimengungen humoser Art
weiß	(w)	gelb	(e)			groß- bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen/ kieseligen Bildungen
Kalkgehalt						OK
kalkfrei	o					
kalkhaltig	+					HN
stark kalkhaltig	++					HZ
						F
Konsistenz						
$0,25 < I_c \leq 0,50$ - sehr weich	-	z		Auffüllungen aus natürlichen Böden	[]	
$0,50 < I_c \leq 0,75$ - weich	-	z		Auffüllungen aus Fremdstoffen	A	
$0,75 < I_c \leq 1,00$ - steif	-	j		Abstand des Bohrabsatzpunktes v. Gleisachse	GA	
$I_c > 1,00$ - halbfest	-	j				
Lagerungsdichte						
$0,15 < I_d \leq 0,35$ - locker	[lo]		Wasserstände		
$0,35 < I_d \leq 0,65$ - mitteldicht	[md]	::::::				
$I_d > 0,65$ - dicht	[d]				
^{x)} GU, GT, SU, ST: 5 - 15 % bei $d \leq 0,063$ mm						
GU, GT, SU, ST: > 15 - 40 % bei $d \leq 0,063$ mm						
				GW	Grundwasser angebohrt	
				GW	Grundwasser nach Bohrende	
				GW	Ruhewasser	
				SW	Schichtenwasser angebohrt	
				SW	Schichtenwasser nach Bohrende	
				SW	Schichtenwasser	

6. Beilagen und Bilder

Beilage 1	Zeittafel und geologische Ereignisse in Südwestdeutschland	97
Beilage 1a	Zeittafel von Pleistozän und Holozän (Quartär) in Deutschland	98
Beilage 2	Zeittafel, Schichtaufbau und Grundwasserverhältnisse in Ludwigsburg	99
Beilage 3	Stratigraphische, lithologische, hydrogeologische und baugrundgeologische Charakterisierung der Schichtfolge in Ludwigsburg	100
Beilage 4, 4a	Geologische Karten von Ludwigsburg	101
Beilage 4b	Durchlässigkeit der Deckschichten	103
Beilage 5	Geologische Schichtprofile und Gliederung der Grundsichten	104
Beilage 6 - 9	Geologische Profilschnitte	106
Beilage 10	Übersichtskarte der Deckschichtenmächtigkeit	118
Beilage 11	Karte der Grundwassergleichen	119
Beilage 12	Karte des Grundwasserflurabstands	120
Beilage 13	Hydrogeologischer Profilschnitt Eglosheim-Neckarweihingen	118
Beilage 14	Hydrogeologischer Schnitt der Tiefbohrungen	121
Beilage 15	Karte des städtischen Altlastenkatasters	122
Beilage 16, 16-a	Karte der baugrundtechnischen Risikoflächen	123
Beilage 17	Karte der geologischen Geländeaufschlüsse, Erdfälle, Steinschläge und Felsstürze	124
Beilage 18	Karte der pleistozänen Terrassenschotter	127
Beilage 19	Die chemische Zusammensetzung der Grundwässer	128
Beilage 20	Grenzen Befahrbarkeit und Bearbeitbarkeit von Böden	129
 Bildtafel 1	Felsabbruch im Neckartal	131
Bildtafel 2	Steinschlag am Otto- Konz- Weg	133
Bildtafel 3	Steinschlagsicherung Poppenweiler, Sommerhalde	133
Bildtafel 4	Steinschlagsicherung am Osteingang des Grünparks Hungerberg	134
Bildtafel 5	Gebäudeunterfangung in der Alleenstraße	134
Bildtafel 6	Baugrube in der Hundshalde Eglosheim	135
Bildtafel 7	Regenüberlaufbecken in Grünbühl	135
Bildtafel 8	Schmutzfangbecken in der Pflugfelder Straße und Rosenstraße	136
Bildtafel 9	Faultürme und Gasbehälter der Kläranlage Hoheneck	137
Bildtafel 10	Baugrube ehem. Gießerei Barth, Martin- Luther- Straße	140
Bildtafel 11	Erdfall in Poppenweiler	141
Bildtafel 12	Erdfall im Favoritepark	142
Bildtafel 13	Ehemaliger Steinbruch Hubele	142
Bildtafel 14	Baugrube der Altlastensanierung auf dem ehemaligen MLF-Gelände	143
Bildtafel 15	Abbruch- und Bodensanierung auf dem Gelände der ehemaligen Flakkaserne	144

Äonothem		Zeit-System, Periode, Supergruppe	Zeit-Serie, Epoche, Gruppe	Lithostratigraphie, regionale Gruppe	Alter in Mio. Jahre	Ereignisse in Südwest-Deutschland	Entwicklung der Lebewelt		
Ärathem		Die Zeit-Stufen, wie z.B. das Aptium in der Frühen Kreide, sind hier nicht dargestellt.		Ablagerungsverhältnisse Blau = Meeresbedeckung in Südwest-Deutschland. -> Ablagerung von Sedimenten. Dunkelgrün = Tiefried mit Fluss- und Beckenlandschaften. -> Ort Ablagerung, teils Abtragung von Sedimenten. Hellgrün = Festland. -> Verwitterung und Abtragung, lokal Ablagerung von Sedimenten.	Die Scale ist nicht linear!		Artensterben Vereisungen Erdachse		
Phanerozoikum		Känozoikum	Quartär	Holozän	(11,7) 12 Ta	Klima der mittleren Breiten	 <p>Weltweite Gebirgsbildung</p>		
				Pleistozän (Eiszeitalter)	(2,58) 2,6				
				Oberrhein-Grabene (Laramic Orogenese - Westen von Nordamerika)	23 (23,04)				
				Meereseinfluss?	66				
			Neogen	Festland in SW-Deutschland	100,5				
				Molasse Becken	(143,1) 145				
			Paläogen	Faltung, Überschiebung, Hebung und Abtragung der Alpen	(161,5) 163,5				
				Späte Kreide	174 (174,7)				
				Frühe Kreide	(201,4) 201,5				
				Später Jura	237 241				
			Jura	Weißer Jura	245,5 (251,9)				
				Mittlerer Jura	258 (259,5)				
				Früher Jura	(298,9) 299				
				Schwarzer Jura	(358,86) 361				
Paläozoikum		Mesozoikum	Trias	Späte Trias	418 (419,62)		 <p>Festland</p> <p>Weißen Jura</p> <p>Brauner Jura</p> <p>Schwarzer Jura</p> <p>Keuper</p> <p>Muschelkalk - Meer</p> <p>Buntsandstein</p> <p>Zechstein* - Meer</p> <p>Rotliegendes*</p> <p>Variscisches Gebirge (Pangaea)</p> <p>Kaledonische Orogenese (Laurasia)</p> <p>Cadomische (Panafrikanische) Orogenese (Pannotia)</p> <p>Ausgangsgesteine der Grundgebirgsschicht: Grauwacken, Kalk, Tonsedimente, Tuffe, Paragneise aus Sedimenten, Amphibolite</p> <p>Grenville Orogenese (Rodinia)</p>		
				Mittlere Trias	444				
				Frühe Trias	485 (496,85)				
				Spätes Perm	539 (538,8)				
Proterozoikum			Perm	Mittleres + Frühes Perm	538,8 - 2500 Ma				
				Rotliegendes*	538,8 - 2500 Ma				
				Spätes + Frühes Karbon	538,8 - 2500 Ma				
				Variscisches Gebirge (Pangaea)	538,8 - 2500 Ma				
Archaikum		(Präkambrium)	Devon	Spät-Mittel-Früh-Karbon	538,8 - 2500 Ma		 <p>Metamorphose im Grundgebirge</p> <p>Granitintrusionen</p> <p>Variscische G. - Kaledonische G.</p> <p>Frühe Geb.-Bildungen</p>		
				Spät-Mittel-Früh-Silur	538,8 - 2500 Ma				
			Silur	Spät-Mittel-Früh-Ordovizium	538,8 - 2500 Ma				
				Spät-Mittel-Früh-Kambrium	538,8 - 2500 Ma				
Hadeum			Neo- Meso- Paläo-	Neo- Meso- Paläo-	538,8 - 2500 Ma		 <p>Frühe Kontinente und Gebirge</p> <p>Frühe Meere</p> <p>Frühe Vulkanismus</p> <p>Weltweiter Vulkanismus</p> <p>Alter der Erde 4.567 Ga</p> <p>Frühe Geb.-Bildungen</p>		
				Neo- Meso- Paläo-	538,8 - 2500 Ma				
				- Beginn der Plattentektonik vor ca. 4 - 3 Ga. - Erste Meere und Landmassen. - Meteoriteinschläge, Kometen	538,8 - 2500 Ma				
				- Kollision der Uerde mit einem anderen Planeten vor 4,5 Ga. Aus den Trümmern ist der Mond entstanden, der seitdem die Erdachse stabilisiert. - Sonne und Planeten entstehen.	538,8 - 2500 Ma				

Beilage 1: Zeittafel und geologische Ereignisse in Südwestdeutschland

Altersangaben nach STDK 2022 und in Klammern nach International Chronostratigraphic Chart ICC v2024/12.

Im Raum Ludwigsburg an der Oberfläche anstehende Schichten

... abgetragene Gesteinsschichten

... in der Tiefe anstehende Gesteine

- sedimentäres Deckgebirge und kristallines Grundgebirge
(Granite und Gneise des Variszischen Gebirges und älterer Zeit-Perioden)

größere Vereisungsphasen in der Erdgeschichte

Artensterben-Großereignisse

Meteoriteinschlag von Nördlinger Riss und Steinheimer Becken vor 14,8 Ma. Beide Krater stammen von einem 1,5 km großen Meteoriten mit einem 150 m Mondbegleiter.

Vermutete stärkere Änderungen in der Neigung der Erdachse, Echte Polwanderung" durch Ungleichgewicht im Erdmantel.

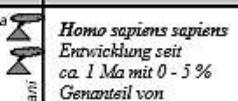
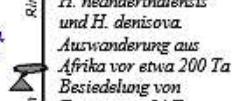
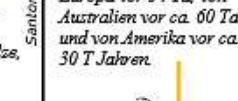
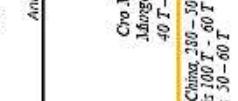
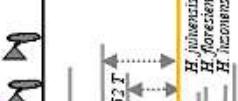
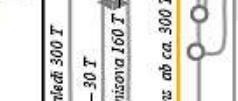
Serien und Stufen	Alter in Jahren vor heute	Vegetations-Zeitstufen in Europa Die Zeitscalen sind nicht linear!	Ostsee-Stadien	Klima in Mittel-Europa	Kulturstufen Bedeutende Vulkanausbrüche	Möglicher Stammbaum der Hominiden
Spät-Mittel-Holozän	Heute - 2450 B.P.	Subatlantikum Kleine Eiszeit ca. 1 - 1,5 °C kälter als heute. Größte Ausdehnung der Alpengletscher im Holozän. Im Mittelalter bis 1 °C wärmer als heute. Die Römerzeit war 1 - 1,5 °C wärmer als heute, die Alpengletscher waren weit zurückgeschmolzen.	Mya-Meer	- warm - kühl - warm - kühl - warm	- Neuzeit <i>(Kleine Eiszeit)</i> - Mittelalter <i>(Völkerwanderung)</i> - Altägypten (<i>Römer</i>) - Eisenzeit (<i>Hallstatt</i>) - Bronzezeit <i>Pyramiden, Nutzung Pferd, Schrift</i> Neolithikum ~3,8 - ~7,5 Ta	
	2450 - 5710 ~4000	Subboreal	Limnea-Meer	- kühl	- Kupferzeit <i>Ötzi, Rad</i> Mesospiegelanstieg durch Gletscherschmelze, <i>Singflut?</i>	
	5710 - 9270 ~8000	Atlantikum Ca. 1 - 3 °C wärmer als heute, die Alpen waren bis in hohe Lagen fast eisfrei.	Litorina-Meer (Löbben-Kaltphase)	- sehr warm Klimoptimum	Mesolithikum (~7,5 - ~11,6 Ta)	
	9270 - 10640	Boreal	Ancylus-See	- kühl		
	10640 - 11650	Präboreal	Yoldia-Meer	- wärmer		
	Alter in 1000 a vor heute nicht linear!	Klimato-/Lithostratigraphie im Alpenvorland in Bad.-Württ. STDK 2022, DSK 2018, LGRE 2016, 2024 (...) nach ICC 2023/9 <i>Litho-Formationen</i>	Klimatostrat. in N-Deutschland u.a. nach STD 2016 und Glob. Ch. Correl. 2020/b			
	11,65 - 114	Würm-Glazial (Komplex) - Spät-Würm Spätglazial - Jüngere Dryas - Alleröd Interstadial - Ältere Dryas - Bölling Interstadial - Älteste Dryas - Meindorf Interstadial	Weichsel-Komplex - Ober-Weichsel Spät-Weichsel - Jüngere Dryas - Alleröd Interstadial - Ältere Dryas - Bölling Interstadial - Älteste Dryas - Meindorf Interstadial	- kalt - wärmer - kalt - wärmer - glazial - wärmer	Jung-Paläolithikum ~11,5 - ~45 Ta - Vor 12,8 und 14,9 Ta möglicher Meteorit / Komet, Abkühlung - Ausbruch der Phlegäischen Felder bei Neapel vor 39 Ta Steinax vor 40 Ta Höhlemalerei, Höhlemodell - Ausbruch des Toba-Caldera-Vulkans in Indonesien vor 74 Ta Nur wenige Tausend Hominiden haben weltweit überlebt	
	11,65 - 23		Hauptvereisungen Meerespiegel 120 m unter heutigem NN	- glazial		
	11,65 - 14,50		- Mittel- Weichsel - Unter-Weichsel - Stadiale, Interstadiale	- kalt, glazial - kalt, kühl		
	11,65 - 12,73		Eem- Warmzeit	- bis zu 5 °C wärmer als heute		
	12,73 - 13,4		Saale-Komplex - Warthe - Dreiecke I + II - Delitzsch - Döbelnitz-Wacken-Warmzeit - Fahne/Mehlbeck	- kühl, kalt - 2-3-mal glazial - warm		
	13,4 - 13,59		Holstein-Warmzeit	- kalt, kühl - warm	Mittel-Paläolithikum ~45 - 200/300 Ta	
	13,59 - 13,72		Elster-Kaltzeit - Spät-Elster - Jüngeres Stadial - Älteres Stadial - Früh-Elster	- kalt - glazial - kalt	Alt-Paläolithikum (Alt-Altsteinzeit) 200/300 - 2,588 Ma Aktives Feuermachen	
	13,72 - 13,85		Cromer-Komplex - 4 (5) Interglaziale, - 3 Glaziale (A, B, C)	Abwechselnd kühl, kalt und glazial mit kurzen und feuchten Warmphasen. Ab Bavel und jünger zunehmend glazial. Mit zunehmendem Alter werden die Kenntnisse der Klimaverhältnisse und die Gliederung der Kaltzeiten unsicher.	Jäger und Sammler Yellowstone Caldera, Ausbruch vor 630 Ta.	
	13,85 - 14,50		Bavel-Komplex - Donau-Kaltzeit - Leerdam-Warmzeit - Linde-Kaltzeit - Bavel-Warmzeit	Zunehmende Nutzung von Werkzeugen aus Stein, Holz und Knochen, Faustkeil, Werkzeuge und Pfeile aus Feuerstein. Erste Schneidewerkzeuge, Erste Steinwerkzeuge.		
	14,5 - 23		Menap-Kaltzeit - Pivava Waal-Warmzeit - Tornesch	1,12 Ma		
	23 - 60		Eburon-Kaltzeit - Leith	1,78 Ma		
	60 - 114		Tegelen-Komplex - 2 Warm-, 1 Kaltzeit, - 2,44 Ma	Warmzeiten mit kurzen Kaltphasen.		
	114 (117)		Prätegelen Komplex - 2 Kalt-, 1 Warmzeit			
Spätes Pleistozän	126 (129)	Terrassenschotter-Formation - Rhengletscher-Niederenassschotter	Diekmanns F.			
	380 (300) (DSK 2016)					
	435 (320)	Rheingletscher Hochterrassenassschotter	Diekmanns F.			
	475	[Mindel]				
	780 (774)					
	1,5 Ma	Oberschwanen-Deckenschotter-F. Hochrhein-Deckenschotter-F. #				
	1,8 Ma	[Biber] Günz-Deckenschotter Donaus-Deckenschotter				
	Reuver	Pliozäne Höhenschotter (Höhensedimente)	Reuver	warm → kühl		
	2,6 - 5,3 Ma					

Abb. 1d: Zeittafel von Pleistozän und Holozän (Quartär) in Deutschland (Vegetationszeitstufen, Klimato- und Lithostratigraphie)

Die stratigraphische Einteilung und die Altersgliederung der Zeitabschnitte im "Pleistozän" (Eiszeitalter) sind im Fluss und Gegenstand der aktuellen Forschung. Im Gegensatz zu den lithostratigraphischen Kaltzeit-Stufen Würm, Riß etc. entspricht die lithostratigraphische Formationsgliederung (rot) fazieskundlichen Hauptdiskontinuitäten. Kenntnisse über die Temperaturen stammen aus Auswertungen von Eisbohrkernen, Sedimenten, Muschelschalen, Tropfsteinen, Pollen und Baumringen. Im Mittleren und Späten Pleistozän gab es größere Klimaschwankungen mit stärkeren Vereisungen als im Frühen Pleistozän. Die Kenntnisse zur Entwicklung der Hominiden sind noch lückenhaft. Der menschliche Stammbaum ist wesentlich komplexer, als heute bekannt ist. Als Ursprungsort der Menschheit ist Afrika belegt. Die Auswanderung auf die anderen Kontinente erfolgte in mehreren Wellen über die arabische Halbinsel. Von zahlreichen Hominidenarten ist der heutige Mensch als einzige Art übriggeblieben.

■ = vermutlich große Schichtlücken in Bad. Württ.; [Mindel, Günz etc.] = Gliederung in Bayern; ↗ = genetischer Austausch nachgewiesen; ? = H. heidelbergensis ist eventuell H. erectus; ♀ = Nesher-Ramla Homo, Israel 2021, 420 - 120 Ta; Homo longi, China 1931/2021, 1,3 Ma - 150 Ta; * = Besiedelung Europas durch H. erectus vor ca. 1,4 Ma; # = Höhere und Tiefer Deckenschotter. Siehe auch Kap. 6.8.

Beilage 2: Zeittafel, Schichtaufbau und Grundwasserverhältnisse im Raum Ludwigsburg

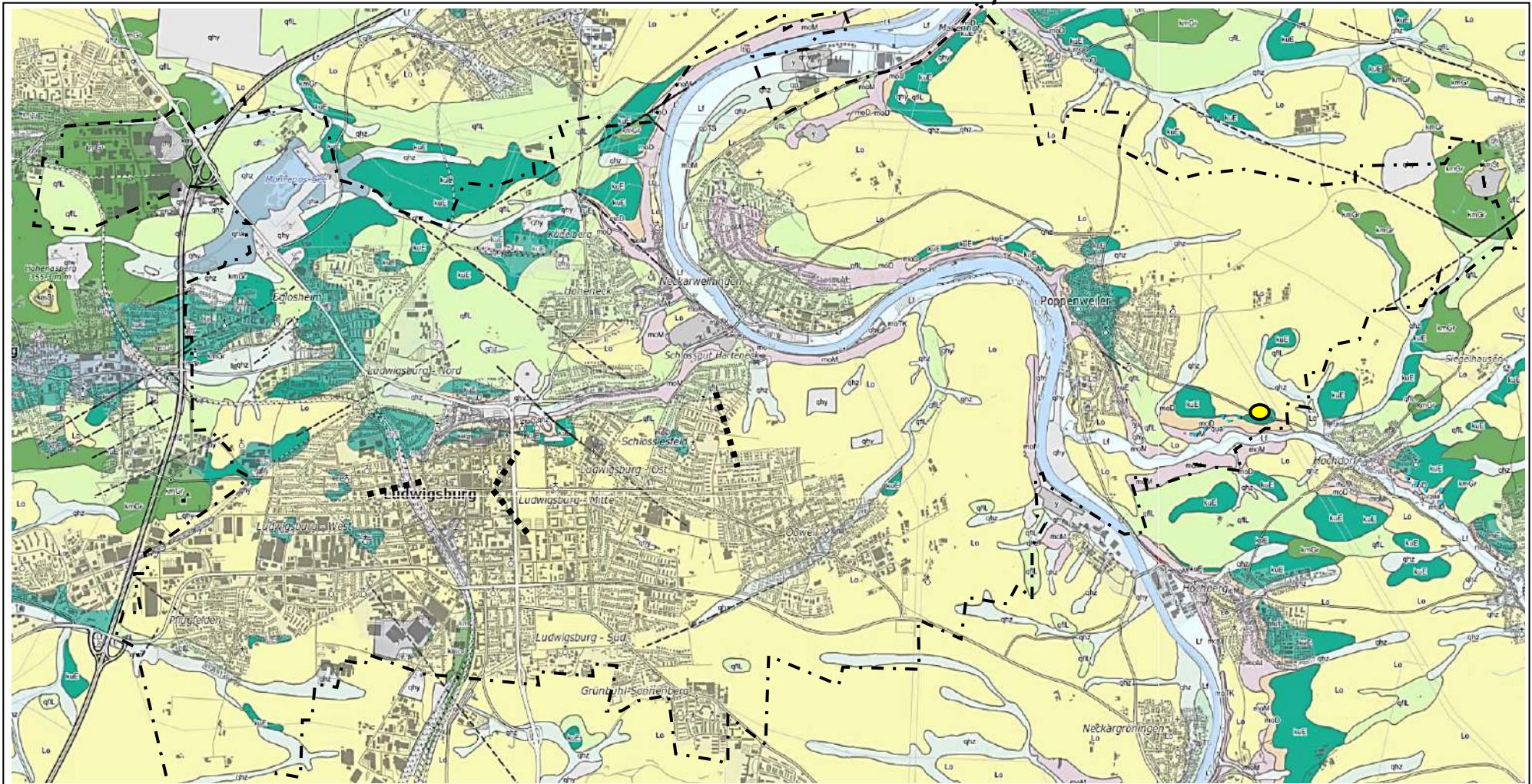
Alle Angaben sind Durchschnittswerte und ersetzen keine spezifischen Untersuchungen bei einzelnen Bauvorhaben.

Beilage 2: Zeittafel, Schichtaufbau und Grundwasserverhältnisse im Raum Ludwigsburg							
Alle Angaben sind Durchschnittswerte und ersetzen keine spezifischen Untersuchungen bei einzelnen Bauvorhaben.							
Allgemeine Gebirgs- und Schichtgliederung	Chronostratigraphische und lithostratigraphische Gliederung, Gesteinsfazies	Lithostratigraph. Formation, Klima Ma = Mio. Jahre, STDK 2022	Schichtmächtigkeit in Ludwigsburg	Lithologische Charakterisierung der Gesteine im Raum Ludwigsburg,	Hydrogeologische Charakterisierung	Grundwasserstockwerke und Grundwassernutzung im Raum Ludwigsburg	
Deckschichten überwiegend Lockergesteine	Känozoikum Erdneuzzeit (0-66 Ma)	Quartär Holozän = heutige Zeit bis 11.700 Jahre Pleistozän = Eiszeitalter 0,0117 - 2,6 Ma <i>Periglazial, äolisch, fluviatil.</i>	Holozän bis 12.000 Jahre Pleistozän Würm-Kaltzeit 0,012 - 0,114 Ma Eem-Warmzeit 0,114 - 0,126 Ma Riß-Kaltzeiten 0,126 - 0,38 Ma Ältere Warmzeiten und Kaltzeiten 0,4 - 2,6 Ma Klima teils warm, teils polar.	0,5 - 10 m, örtlich bis 18 m.	Ablagerungen des Periglazialbereichs (= Frostbereiche außerhalb der Eisbedeckung) während der Würm- und Riß-Kaltzeiten. Fahlgelber Löss, an der Oberfläche 0,5 bis 2 m tief zu gelbbraunem Lösslehm verwittert. Fliesenberden, Hang-/Talschlütt-, Abschwemmimassen, Auenlehme, Talkiese, organische Ablagerungen (Ammoor, Schlicklinse), kaltzeitliche Terrassenschotter. Die "Höheren Terrassenschotter" sind älter als 0,4 Millionen Jahre.	Porengrundwasserleiter (Lockergesteins-Grundwasserleiter). Je nach Tonanteil auch Grundwasser-Geringleiter. Kopplung mit Grundwasserleiter im Gipskeuper und Lettenkeuper.	Oberes Grundwasserstockwerk Gekoppelter Grundwasserleiter in Quartär Gipskeuper und Lettenkeuper. Niedrig mineralisiertes Grundwasser mit geringer bis mittlerer und selten auch hoher Ergiebigkeit. Örtlich sind gespannte Grundwasserverhältnisse möglich. In der Innenstadt und in der Weststadt oft mit "leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen" (LHKW) verunreinigt. Früher Nutzung nach Reinigung im Stadtbad. In früherer Zeit private und öffentliche Wasserversorgung von Ludwigsburg.
Grundsichten überwiegend Feste steine	Mesozoikum Erdmittelalter (251,9 ... 252,5 - 66 Ma; Alter nach STDK 2022)	Paläogen und Neogen (früher Tertiär) (66 - 2,6 Ma) Diese Schichten wurden im Raum Ludwigsburg nicht abgelagert. Mächtige Sedimente gibt es in Oberschwaben und im Oberrheingraben.	Kreide (145 - 66 Ma) Gesteinsschichten der Kreidezeit sind in Baden-Württemberg nicht bekannt. Reste gibt es in Vulkanschlüttungen und in Karstspalten.				
Deckgebirge	Jura (201,5 - 145 Ma) Die Gesteinsschichten der Jurazeit wurden im Raum Ludwigsburg abgetragen. Mächtige Sedimente gibt es im Albvorland und im Bereich der Schwäbischen Alb.	Die höheren Schichten von Mtl. Keuper und Ob. Keuper (Späte Trias) - Bunte Mergel, Kieselandsstein, Stubensandstein, Knollenmergel, Rhätsandstein wurden im Raum Ludwigsburg in den vergangenen 145 Millionen Jahren abgetragen. Sie bilden heute die bewaldeten Höhenzüge rund um Stuttgart, die Löwensteiner Berge und den Strom- und Heuchelberg.					
Grundsichten überwiegend Feste steine	Frühe-, Mittlere-, Späte Trias	Mittlerer Keuper (209,5 - 237 Ma) 3 Ma Schichtlücke zwischen Gipskeuper und Schiffsandstein. Fazies siehe nächste Spalte.	Schiffsandstein (Stuttgart-Formation), 229,5 - 231 Ma. <i>Terrestrisch-fluviatile Schwemms- und Delta-Ablagerungen. Semiarid-subtropische Halbwüste.</i>	Auf der Kuppe des Lembergs ca. 25 m Erosionsrest.	Am Lemberg massive, rötliche, gelbliche, grünliche Sandsteinbänke (Flutfazies) neben feinsandig-schluffige Tonsteine (Normalfazies) Im Schiffsandstein werden oft Pflanzenreste von Schachtelhalmen gefunden.	Kluftgrundwasserleiter (Festgestein-Grundwasserleiter) mit geringer Wasserführung. In Ludwigsburg ohne Bedeutung.	Die Grundwasserflurabstände liegen in Mulden- und Tallagen 1 bis 3 m unter Gelände und in Hanglagen und Kuppenlagen 3 bis über 10 m u.a. Die jahreszeitlichen Schwankungen der Grundwassерstände liegen oft im Bereich von 0,5 bis 2 Meter, selten über 5 Meter. <i>Eine Vorhersage von Grundwassertiefen und Grundwassermengen ist nur sehr eingeschränkt möglich. Genaue Daten sind nur nach geotechnischen Untersuchungen möglich.</i>
		Unterer Keuper (237 - 241 Ma) <i>deltatisch, brackisch, paratidalisch-amphibatisch, flachmarin, terrestrisch</i>	Gipskeuper (Grabfeld-Formation) 233 - 237 Ma. <i>Terrigen, fluviatil-limnisch, brackisch, kurzzeitig flach-marin und sulfatisch-salinar. Wechselhaft feucht-trocken-arides Klima.</i>	Im Stadtgebiet 0 m bis ca. 35 m am Salzwald. Am Lemberg bis ca. 100 m.	Rotbraune, Violette, graue und olivgrau, (dolomitische) Tonsteine mit einzelnen Dolomitsteinbänken und Gipslagen. An der Basis ca. 15 m Grundipsschichten (Gips, Anhydrit), deren Reste in LB v.a. westlich des Neckars zu schwachschichtigen, bröckeligen Tonsteinen und Zellendolomiten verwittert und ausgelaugt sind.	Im unausgelaugten Bereich Kluftgrundwasserleiter mit geringer, selten höherer Grundwasserführung. Im ausgelaugten Bereich Kluft- und Porengrundwasserleiter.	
		Obere Muschelkalk (241 - 242,4 Ma) <i>Flachmarin-lagunär, teils brackisch</i>	Trigonodusdolomit (Rottweil-F.) Ob. HauptmuKa (Meissner-F.) Unt. HauptmuKa (Trotzitenkalk-F.) <i>Wüstenartig-trop.-arides Klima.</i>	Im Neckartal unter der Talaeue ca. 10 - 12 m, sonst bis ca. 85 m.	An der Obergrenze 5 - 10 m massiger und kavernöser, gelber Trigonodusdolomit. Darunter gebankte, helle, graue und bläuliche, bioklastische und kristalline Kalksteine mit dünnen und dunklen Ton- und Tonmergelsteinfugen.	Kluftgrundwasserleiter mit v.a. in Talnähe verkarsteten Bereichen. Schwebende Horizonte über Tonsteinfugen.	
		Mittlerer Muschelkalk (242,4 - 243,5 Ma) <i>Eingeschränkt flachmarin-lagunär und salinar (Sulfat- und Salzgesteine).</i>	Oberer Dolomite (Diemel-Formation) Salinargesteine (Heilbronn-Formation) Untere Dolomite (Karlstadt-Formation) <i>Wüstenartig-hocharides Klima.</i>	Nach Auslaugung Restmächtigkeit ca. 60 m. Nicht an der Oberfläche aufgeschlossen!	An der Ober- und Untergrenze ca. 6 - 10 m flachmarine, graue Obere und Untere Dolomite. Dazwischen tonige Auslaugungsreste der lagunären Salzgesteine und Sulfatgesteine (Gips und Anhydrit) im Stadium der Auslaugung. Erdfälle sind möglich.	Obere und Untere Dolomite: Kluft- und Karstgrundwasserleiter. Evaporitgesteine: Grundwasser-Geringleiter, bei Gipsauslaugung Kluftgrundwasserleiter. Auslaugungstone: Grundwasser-Geringleiter.	
		Unterer Muschelkalk (243,5 - 245,5 Ma) <i>Flachmarin, teils brackisch</i>	Wellenkalk (Jena-Formation) Wellendolomit (Freudenstadt-F.) <i>Wüstenartig-tropisch-arides Klima.</i>	Ca. 50 m.	Flachmarine graugelbliche dolomitische Mergelsteine, Dolomitsteine und Kalksteine in Wechsellagerung.	Kluftgrundwasserleiter mit geringer Wasserführung, gering durchlässig.	
		Oberer, Mittlerer- und Unterer Buntsandstein (245,5 - 252,5 Ma) <i>Terrigen-fluviatil, teilweise flachmariner Einfluss.</i>	Röttion-Formation Plattensandstein-Formation VogesenSandstein-Formation Eck-Formation Heißes Binnenklima, hocharide Tropenwüste. Arid = Verdunstung > Niederschlag.	Ca. 270 m.	An der Obergrenze ca. 5 m flachmarine Röttone. Darunter mächtige rote, gelbe und ockerfarbenen, terrigen-fluviatile Sandsteinformationen mit Geröllen und Schlufftonsteinlagen. <i>Der Buntsandstein tritt im Schwarzwald und im Odenwald zutage und bildet im mittleren und nördlichen Schwarzwald viele Höhenzüge.</i>	Kluftgrundwasserleiter mit geringer Ergiebigkeit. Im MtL und Unt. Buntsandstein größere Ergiebigkeit. Das Grundwasser im Plattensandstein ist im Raum Ludwigsburg mindestens 30.000 Jahre alt.	
		Paläozoikum Erdaltertum (538,8 Ma bis 252,5 ... (251,9) Perm, Karbon, Devon, Silur, Ordovizium, Kambrium.	Zwischen Buntsandstein und Grundgebirge gibt es in Baden-Württemberg trogförmig verlaufende Senken mit Sedimenten aus den Zeiten von z.T. Devon, Karbon und v.a. Perm (ca. 160 m Rotliegendes und flachenhaft Zechstein; Sandsteine, Konglomerate, Tonsteine, Dolomitsteine, Vulkane).	Grundgebirgssockel (alter als 300 Ma) Metamorph, plutonisch			
		Präkambrium (Proterozoikum, Archäikum, Hadeum) Erdfrühzeit (älter als 538,8 Ma).	Obere Erdkruste mit Übergang in die Untere Erdkruste. In BW insgesamt 24 km (Oberrhein) bis 30 km (Bodensee) mächtig.	Prävariszische und variszische Gneise (metamorph umgewandelte Kalke, Tone, Grauwackensedimente und Magmatite), die von granitischen Intrusionen während und nach der variszischen Gebirgsbildung vor 370 - 320 Millionen Jahren durchschmolzen wurden. <i>Das Grundgebirge bildet im mittleren und südlichen Schwarzwald viele Höhenzüge.</i>	Im Grundgebirge von Schwarzwald und Odenwald. Kluftgrundwasserleiter mit Mineral- und Thermalwässern, korrespondierend mit dem Grundwasser im Buntsandstein.	Unteres Grundwasserstockwerk Im Plattensandstein des Oberen Buntsandsteins hoch mineralisierte und im Neckartal artesisch gespannte Sole mit 29.000 mg/l Natriumchlorid, Sulfat und 17 °C Temperatur. Geringe Ergiebigkeit. Therapeutische Nutzung im Heilbad-Hohenek. Gespannter Grundwasserspiegel bei ca. 50 mNN. Aufstieg im Bohrloch auf ca. 198 - 203 mNN.	
						Im kristallinen Grundgebirge Grundwasser im Bereich von tektonischen Störungszonen, im Grenzbereich verschiedener Gesteinsarten und im Bereich alter Klüfte und Zirkulationswege.	

Beilage 3: Stratigraphische, lithologische, hydrogeologische und baugrundgeologische Charakterisierung der Schichtfolge in Ludwigsburg

Alle Angaben sind Durchschnittswerte und ersetzen keine spezifischen Untersuchungen bei einzelnen Bauvorhaben.

Kurz-zeichen Alter	Schichtprofil		Geologisch lithostrati-graphische Einheiten	Mächtigkeit	Lithologische Charakterisierung	Hydrogeologische Charakterisierung <i>Alle Angaben sind Durchschnittswerte.</i>	Baugrundgeologische Charakterisierung
y, q, L hier 0-0,9 Ma	Deckschichten	Auffüllungen und Quartär können je nach den morphologischen Verhältnissen über allen Grundsichten liegen.	Auffüllung	0 -bis > 5 m	Auffüllung: Schutt, Steine, sandige Lehme, Blöcke, z.T. mit Müllresten, Schadstoffe.		
kmSt ~229,5 - 231 Ma		Normalfazies	Quartär diskordant über allen Grundsichten vorkommend.	0,5 - 10 m, örtlich bis 18 m.	Quartär: Flächen: Lösslehm, Löss, org. Tallehm; Schluff und Lehm, z.T. sandig, tonig. Hang: Fließerden, Abschwemmmassen, Hangschutt, Schluff und Ton, sandig bis steinig. Hangfuß: Schluff und Ton, sandig, kiesig, steinig, Steinblöcke. Talauen: Schluffig-sandige Lehme, Tone, teils w. organisch, sandige Kiese, Schlicklinsen, Steinblöcke.	Porengrundwasserleiter (Lockergesteins-Grundwasserleiter). Je nach Tonanteil Grundwasser-Geringleiter. Geringe, selten mittlere Ergiebigkeit. Kopplung mit Gipskeuper und Lettenkeuper. Gespannte Grundwasserverhältnisse sind möglich.	Auffüllungen: Oft heterogene und gering verdichtete Zusammensetzung. Setzungsempfindlich und wenig tragfähig, oft Müll und Schadstoffe. Als Baugrund selten geeignet. Quartär: Lösslehm, Löss: Ab steifer Konsistenz durchschnittlicher Baugrund. Kritisch im Grundwasser. Die Lehme sind sehr frostempfindlich und schrumpfempfindlich. Fließerden: Ab steifer Konsistenz durchschnittlicher Baugrund. Hanglehm: Bei steifer Konsistenz durchschnittlicher Baugrund. Hangschutt: Bei hohem Steinanteil und ab steifer Konsistenz des Zwischenmittels durchschnittlicher bis günstiger Baugrund.
kmGr 233 – 237,5 Ma		Rinnenfazies	Schilf- sandstein Stuttgart-F-Formation	Auf der Kuppe des Lembergs bis ca. 25 m.		Kluftgrundwasserleiter (Festgestein-Grundwasserleiter) mit geringer Wasserführung. In Ludwigsburg ohne Bedeutung.	
		Normalfazies					
		Esterienschichten					
		Anatinabank					
		Acrodus-Corbula Horizont					
		Mittlerer Gipshorizont					
		Bleiglanzbank					
		Dunkelrote Mergel					
	Grundsichten	Bochinger Horizon Bochinger Bank					
		Grundgips- schichten*	Gipskeuper Gräfeld-F-Formation	Im Bereich des Lembergs bis ca. 100 m. Die Sulfate sind ober- flächennah oft ausgelauft.	Flutfazies: Feinkörniger roter, grau- grüner und oft gut gebankerter Sandstein. Normalfazies: Ton- und Siltsteine mit Feinsandlagen.	Im unausgelaugten Bereich Kluftgrund- wasserleiter mit geringer, selten höherer Grundwasserführung. Im ausgelaugten Bereich Kluft- und Porengrundwasser- leiter auch mit höherer Grundwasser- führung.	
				Im Bereich Salonwald bis ca. 35 m. Im Stadt- gebiet je nach Abtragung ca. 15 m. Die Sulfate sind hier ausgelauft.	Im Bereich Salonwald bis ca. 35 m. Im Stadt- gebiet je nach Abtragung ca. 15 m. Die Sulfate sind hier ausgelauft.	Geringe GW-Führung in aufgewitterten Tonhorizonten.	
					* Die Auslaugung der Sulfatgesteine in den Grundgipschichten ist im Stadtgebiet nahezu abgeschlossen. Übrig geblieben sind tonige Gipsresiduen und Zellenkalksteinbrocken.	Karstgrundwasserleiter in Bereichen mit aktiver Gipsauslaugung und über der Gipsauslaugungsfront (nicht in Ludwigsburg). Das Grundwasser im Bereich Salonwald- Karlshöhe ist eventuell betonaggressiv! Kopplung mit Quartär und Lettenkeuper.	
							Unverwittert bis mäßig verwittert: Günstiger bis durchschnittlicher Baugrund, tragfähig und mäßig setzungsempfindlich.
							Deutlich bis vollständig verwittert und entfestigt: Durchschnittlicher bis oft ungünstiger Baugrund, v.a. bei Gründung im Grundwasser.
							Kritischer Baugrund bei Gefahr von Hohlräumen durch Auslaugung in den Grundgipschichten. In Ludwigsburg bisher nicht beobachtet. Rutschungen sind möglich!
kuE 237,5- 241 Ma		Grenzdolomit Grüne Mergel Lingula Schichten** Anoplophora-Sch. Anthrazonitbank Hauptsandstein Esterienschichten Basisschichten	Letten- keuper Erfurt-F-Formation	Je nach Abtragung 0 - 23 m.	Enge Wechselfolge von veränderlich festen graugrünen Ton- und Schluffsteinen und geklüfteten, grauen Dolomitsteinbänken, gelbgrauer Hauptsandstein.	Kluftgrundwasserleiter mit schichtiger Gliederung. Geringe bis mittlere, selten hohe Ergiebigkeit. In früherer Zeit Wasserversorgung von Ludwigsburg. Notwasserbrunnen in Poppenweiler, Kopplung mit den quartären Deckschichten.	Unverwittert bis mäßig verwittert: Günstiger bis durchschnittlicher Baugrund, wenn fest und kompakt (Bodenklasse 5 - 6, selten 7 - alte DIN 18300). Dünnbankig = reduzierte Standfestigkeit, unterlagern weichere Tonsteine. Entfestigte und verwitterte Tonsteine: Durchschnittlicher bis oft ungünstiger Baugrund.
mo... ...D ...M ...TK 241 - 242,4 Ma		Trigonodusdolomit (Rottweil-Formation)		Im Neckartal unter den Auensedimenten ca. 10 - 12 m, auf der Gäufläche je nach Abtragung bis maximal ca. 88 m.	Trigonodusdolomit (5 - 10 m): Gelbgrauer und dickenbankiger, oft klüftig- kavernöser und auch verkarsteter Dolomitstein und dolomitischer Kalkstein.	Kluftgrundwasserleiter mit verkarsteten Bereichen. Oft schwedende GW- Horizonte über Tonmergelsteinen. Kopplung mit den Oberen Dolomiten des Mittleren Muschelkalks und mit dem Grundwasser in den Kiesen im Neckartal. Im Bereich der Haßmersheimer Schichten eingeschränkte Stockwerksverbindung. Geringe, oft mittlere und örtlich hohe Ergiebigkeit. Fassung der Notwasser- versorgung und Wasserversorgung des Freibades. Mineralwasserbrunnen in Hohenegg im Neckartal. Der Solebrunnen in Hohenegg wird vom tieferliegenden Buntsandstein gespeist.	Schwach geklüftet, gering - mäßig verwittert: Günstiger Baugrund. Mehrkosten beim Lösen von Fels möglich (Bodenklasse 6 - 7 - alte DIN 18300). Deutlich geklüftet, verwittert und gering verkarstet: Durchschnittlicher Baugrund Stark verwittert, entfestigt und geklüftet, stark verkarstet mit Spaltenbildung: Ungünstiger Baugrund.
		Oberer Hauptmuschelkalk (Meißner-F-Formation)					
		Unterer Hauptmuschelkalk (Trochitenkalk-F-Formation)	Oberer Muschelkalk Rottweil-Formation, Meißner F- Trochitenkalk F-				
		Haßmersheimer Sch.					



Beilage 4: Geologische Karte von Ludwigsburg ohne Deckschichten, siehe Abb. 4.

Ausschnitt aus: Geologische Karte von Baden-Württemberg. Kartenviwer des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg, RP Freiburg 2024.

Holozäne und pleistozäne Deckschichten

[Light gray square]	qhy Anthropogene Auffüllung
[Dark blue square]	pha Holozäne Altwasser-ablagerungen, Anmoor
[Light gray square]	phz Holozäne Abschwemmmassen
[White square]	Lf Auenlehm (oft anthropogen)
[Yellow square]	Lo Lösslehm, Löss

Keuper

[Light green square]	qfL Lössführende Fließerden
[Light green square]	qpTS Terrassensedimente (sandige Kiese)

Oberer Muschelkalk

[Light green square]	kmSt Schilfsandstein Stuttgart-Formation
[Olive green square]	kmGr Gipskeuper Grabfeld-Formation
[Teal square]	kmE Lettenkeuper Erfurt-Formation
[Light green square]	moD Trigonodus-Dolomit Rotweil-Formation
[Pink square]	moM Ceratitenkalk Meißner-Formation
[Pink square]	moTK Trochitenkalk-Formation



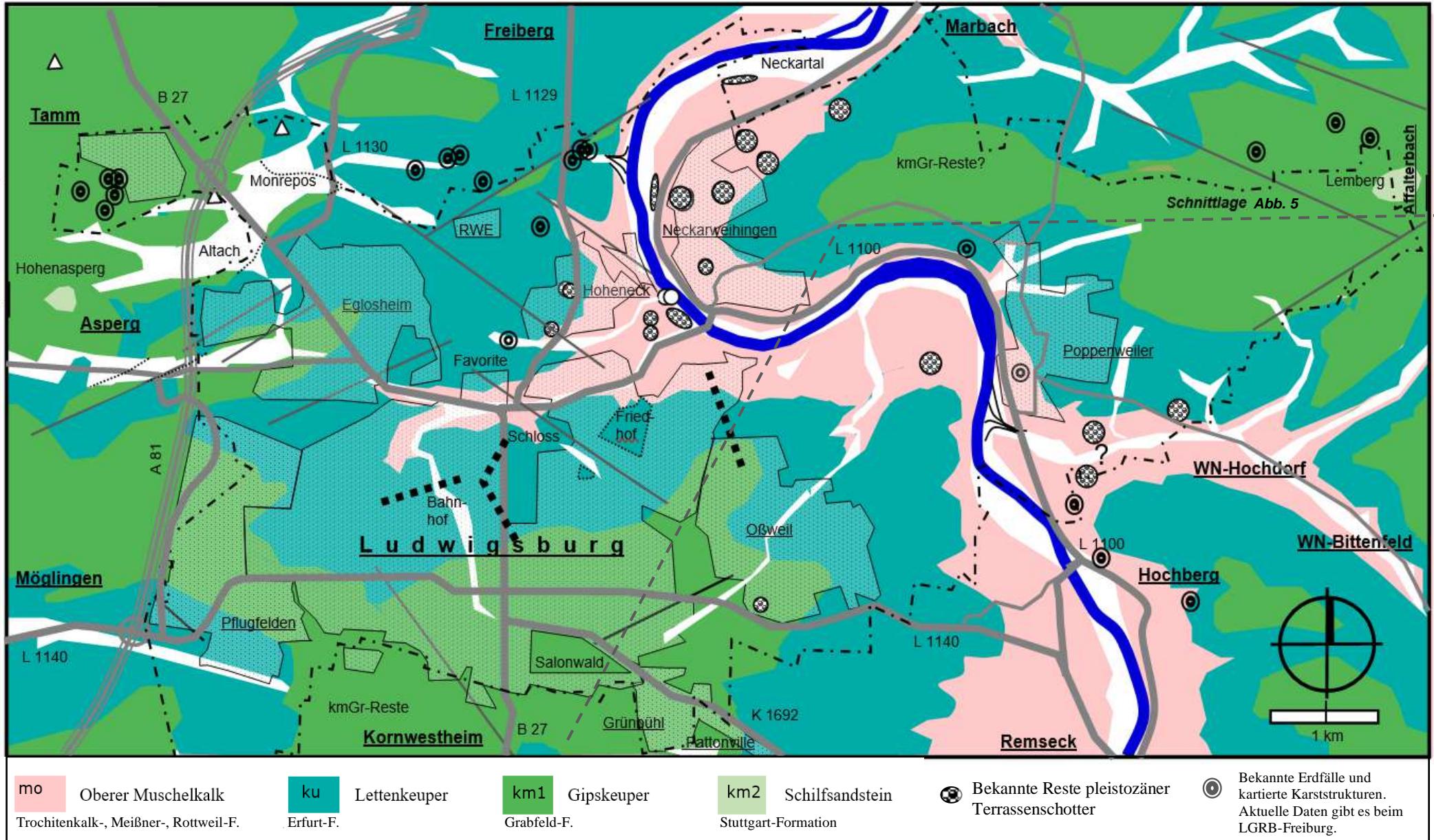
Nord

0 1 km

Tektonische Störungen,
z.T. vermutet

Bekannte, mit Lehm
und Tonen plombierte Tälchen

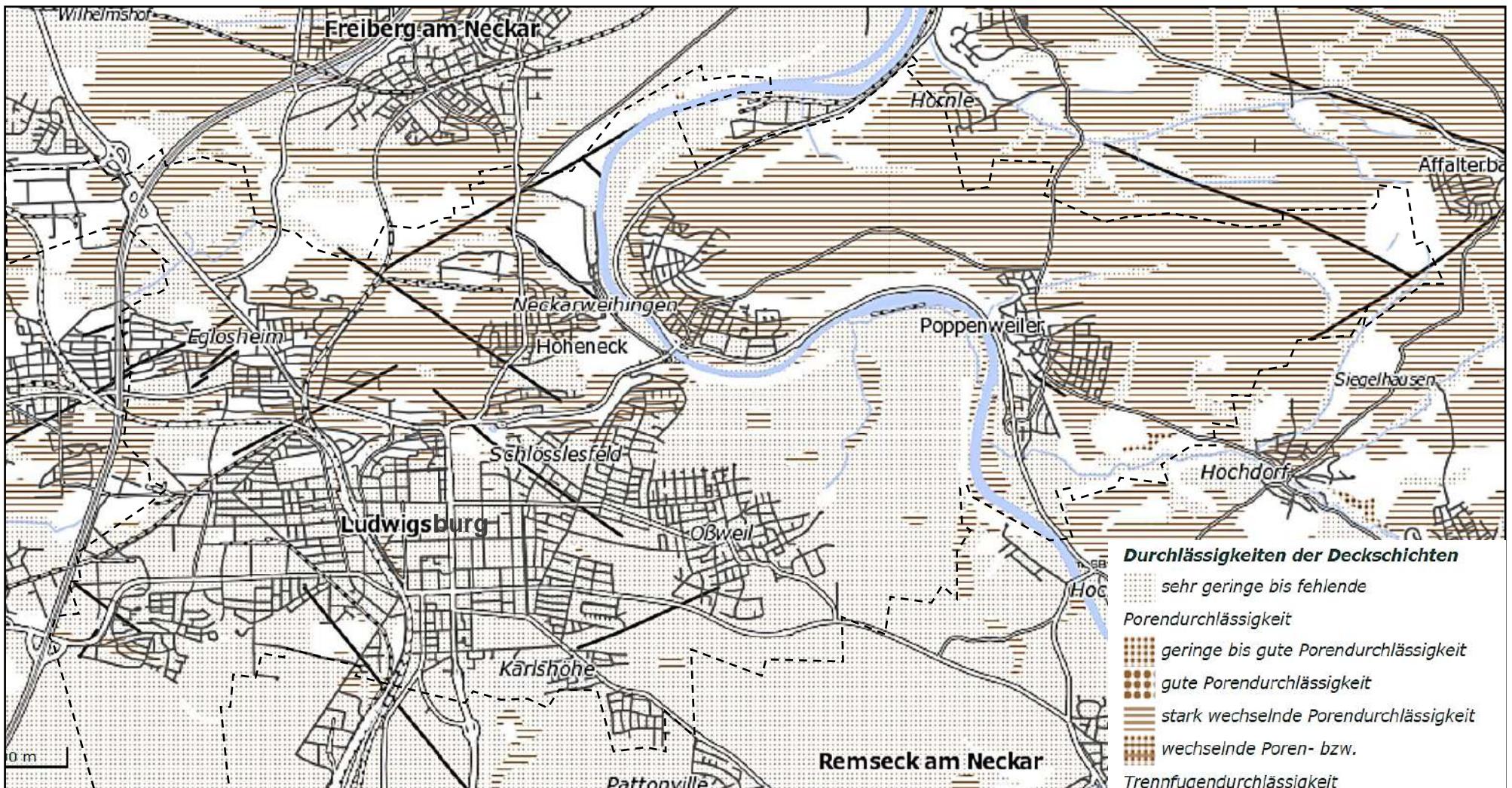
Ehem. Kiesgrube mit
Travertin von Poppenweiler



Beilage 4a: Karte der geologischen Grundschichten in Ludwigsburg

Dargestellt sind die teils bekannten und teils vermuteten Ausstriche der Grundschichten von Oberem Muschelkalk, Lettenkeuper, Gipskeuper, Schilfsandstein und größere Talauen. Die 0,5 m bis über 10 m mächtigen Deckschichten aus Lösslehm, Löss, Verwitterungslehmen, Fließerden und Schuttmassen sind hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt (abgedeckte Karte). Sie sind in der Baugrundkarte M 1 : 10000 in Kapitel 8 dargestellt. Profilschnitt siehe Abb. 5.

Alte, mit Lehm und Tonen plombierte Tälchen

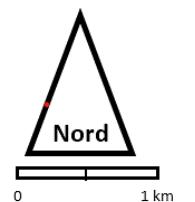


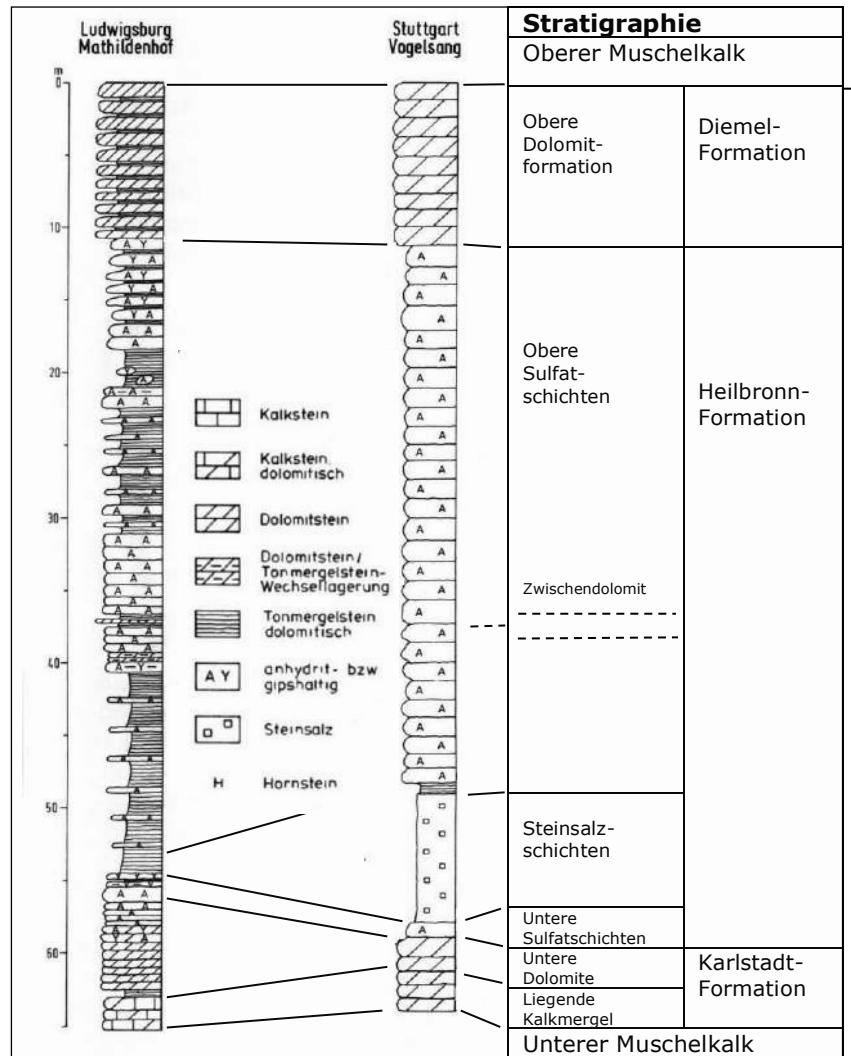
Beilage 4b: Durchlässigkeit der Deckschichten.

Dargestellt ist die Durchlässigkeit der Deckschichten für versickerndes Regen- und Oberflächenwasser.

Wie im Text beschrieben, zeigt sich eine „sehr geringe bis fehlende Porendurchlässigkeit“ der sehr feinkörnigen und lehmigen Lösssedimente auf den Gäuflächen westlich des Neckars. Die „Lössführenden Fließerden“ im Ost- und Nordteil der Markung haben durch ihren wechselnden Steinanteil eine „stark wechselnde Porendurchlässigkeit“. Bereiche ohne Signatur sind an oder nahe der Oberfläche liegende felsartige Grundsichten.

Ausschnitt aus: Geologische Karte von Baden-Württemberg. Kartenviwer des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), Baden-Württemberg, RP Freiburg.





Links: Mittlerer Muschelkalk in der Grundwasserbohrung Mathildenhof in Ludwigsburg mit ausgelaugten Steinsalzsichten und Sulfatschichten in fortschreitender Auslaugung. Rechts zum Vergleich: Mittlerer Muschelkalk in Stuttgart mit vollständiger Sulfat- und Salinarformation.

Schichtprofile ergänzt aus: H. Brunner (1998): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1 : 50 000, Erläuterungen Stuttgart und Umgebung. LGRB-BW, Freiburg.

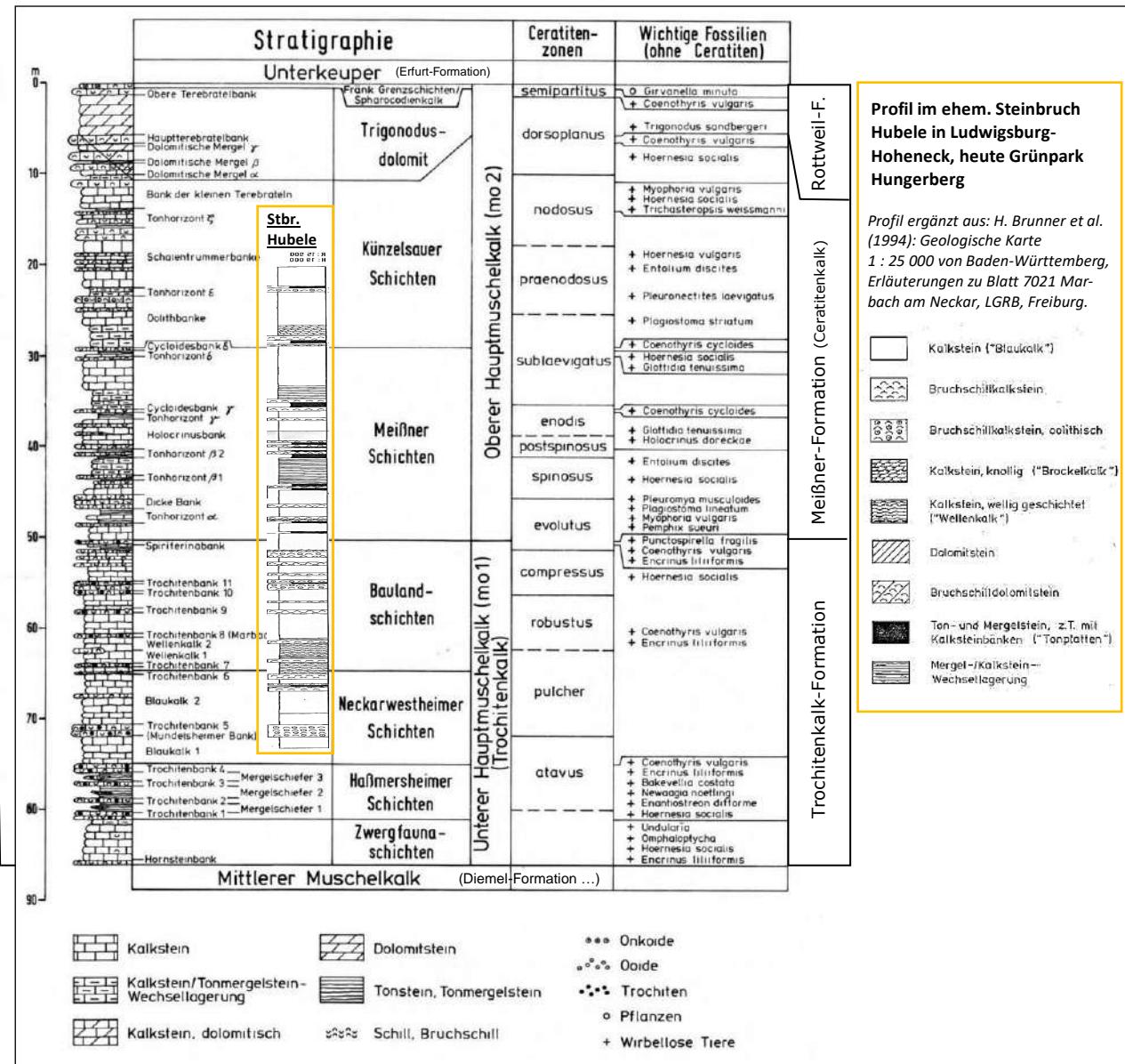
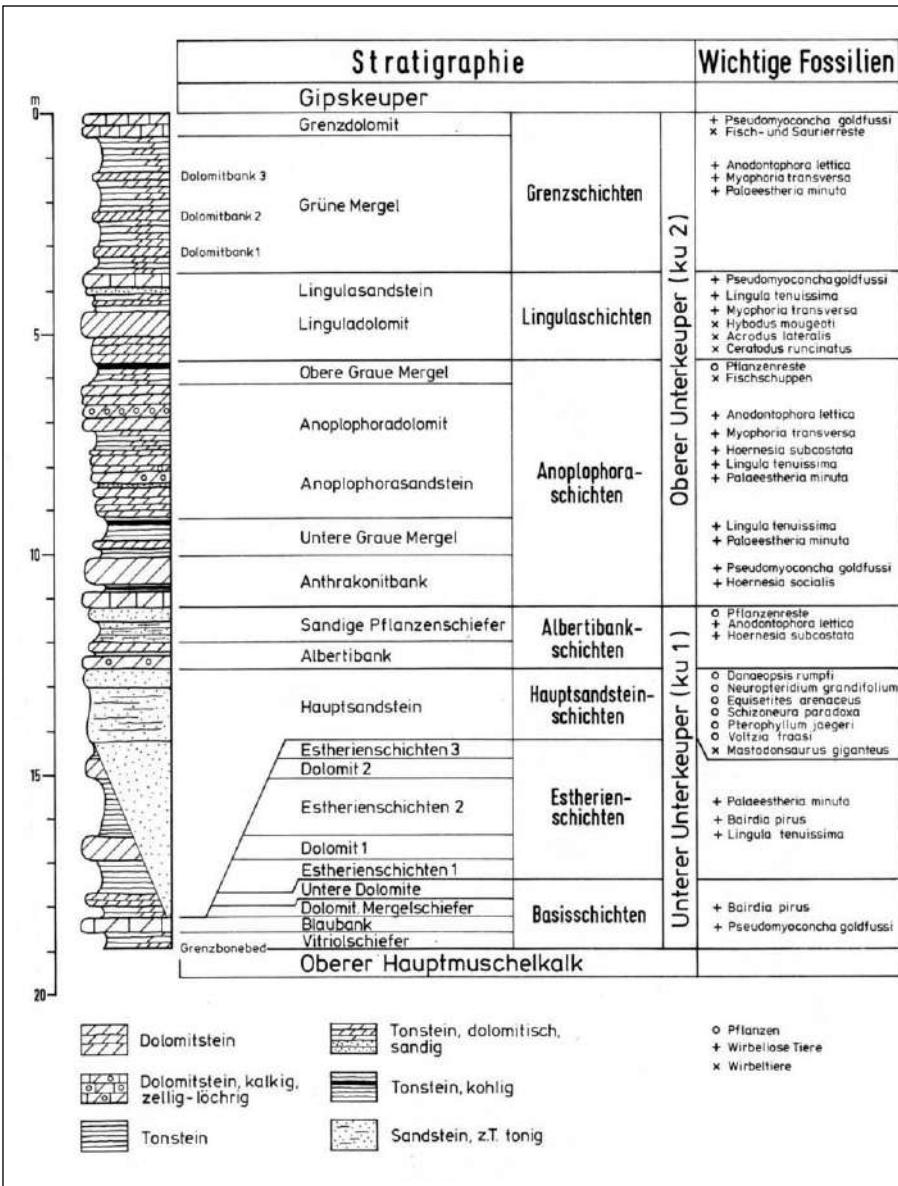
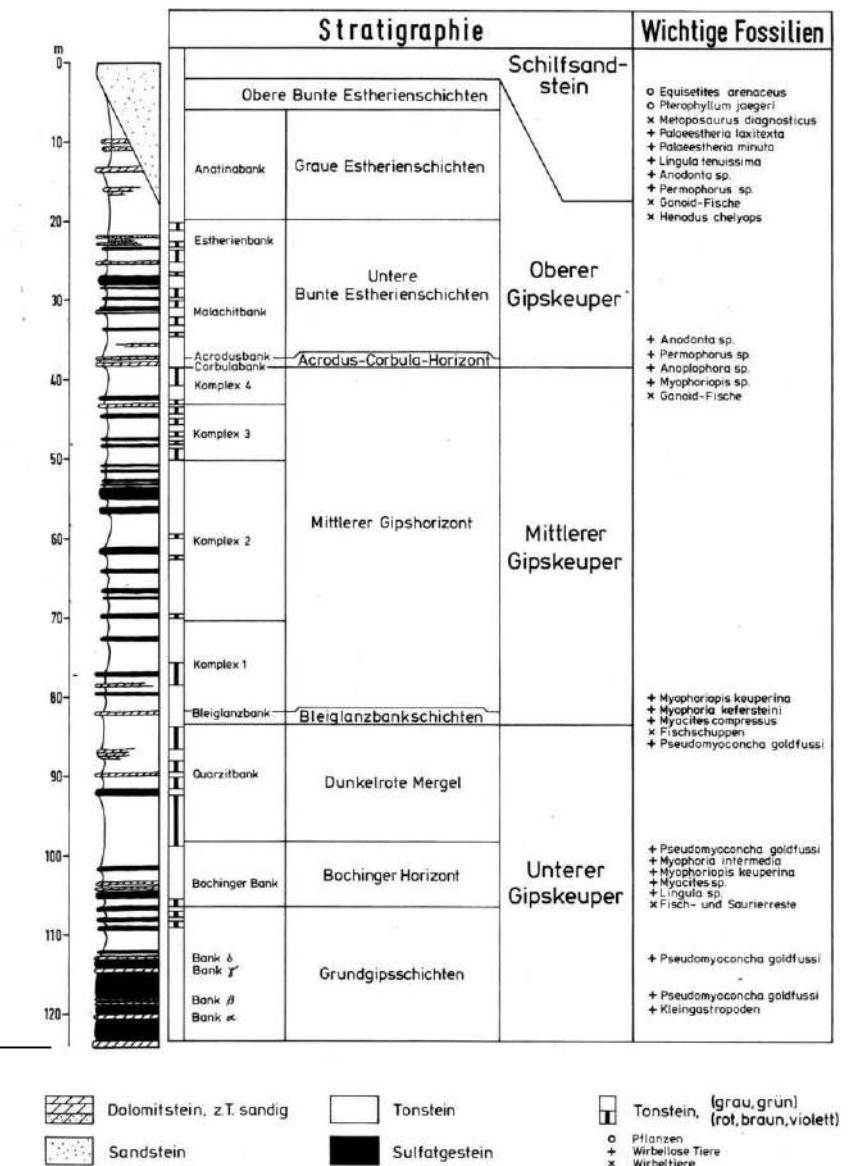


Abb. 5b: Geologisches Standardprofil des Oberen Muschelkalks (Rottweil-, Meissner- und Trochitenkalk-Formation) im Raum Stuttgart und Profil im ehemaligen Steinbruch Hubele in Ludwigsburg-Hoheneck.



Beilage 5c: Geologisches Standardprofil des Lettenkeupers (Erfurt-Formation)
- Unterer Keuper - im Raum Stuttgart

Schichtprofile aus: H. Brunner (1998): Geologische Karte von Baden-Württemberg
1 : 50 000, Erläuterungen zum Blatt Stuttgart und Umgebung. LGRB-BW, Freiburg.



Beilage 5d: Geologisches Standardprofil des Gipskeupers (Grabfeld-Formation)
- Mittlerer Keuper - im Raum Stuttgart

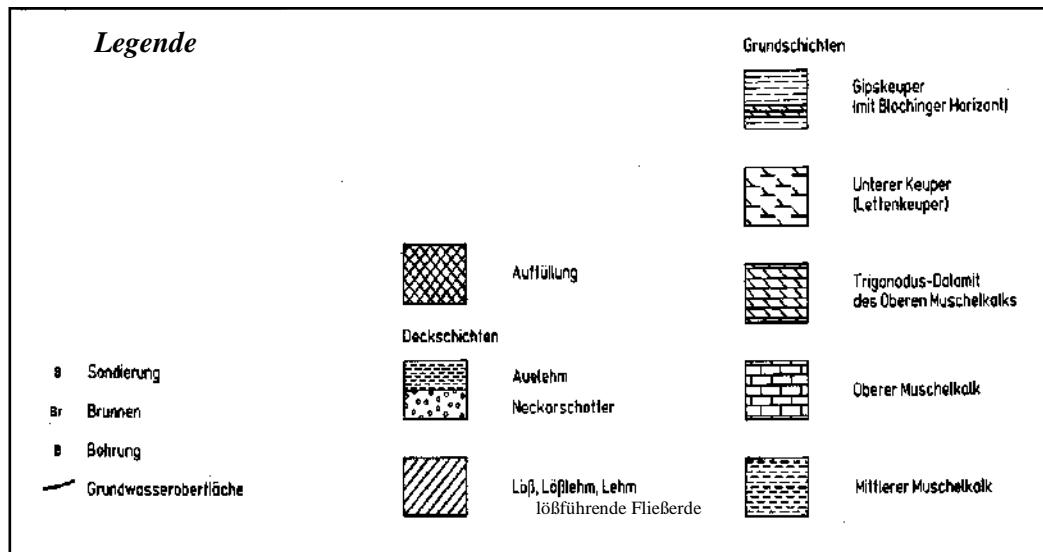
Die Sulfatgesteine (Gips und Anhydrit) unterliegen oberflächennah, in Hangbereichen, in Tallagen und in Klingen bevorzugt der Auslaugung durch versickerndes Niederschlagswasser und Grundwasser (Subrosion). Das kann zur Bildung von Hohlräumen führen, hat Auswirkungen auf die Baugrundqualität und kann zu komplexen Grundwasserverhältnissen führen.

Beilagen 6 bis 9: Geologisch-hydrogeologische Profilschnitte

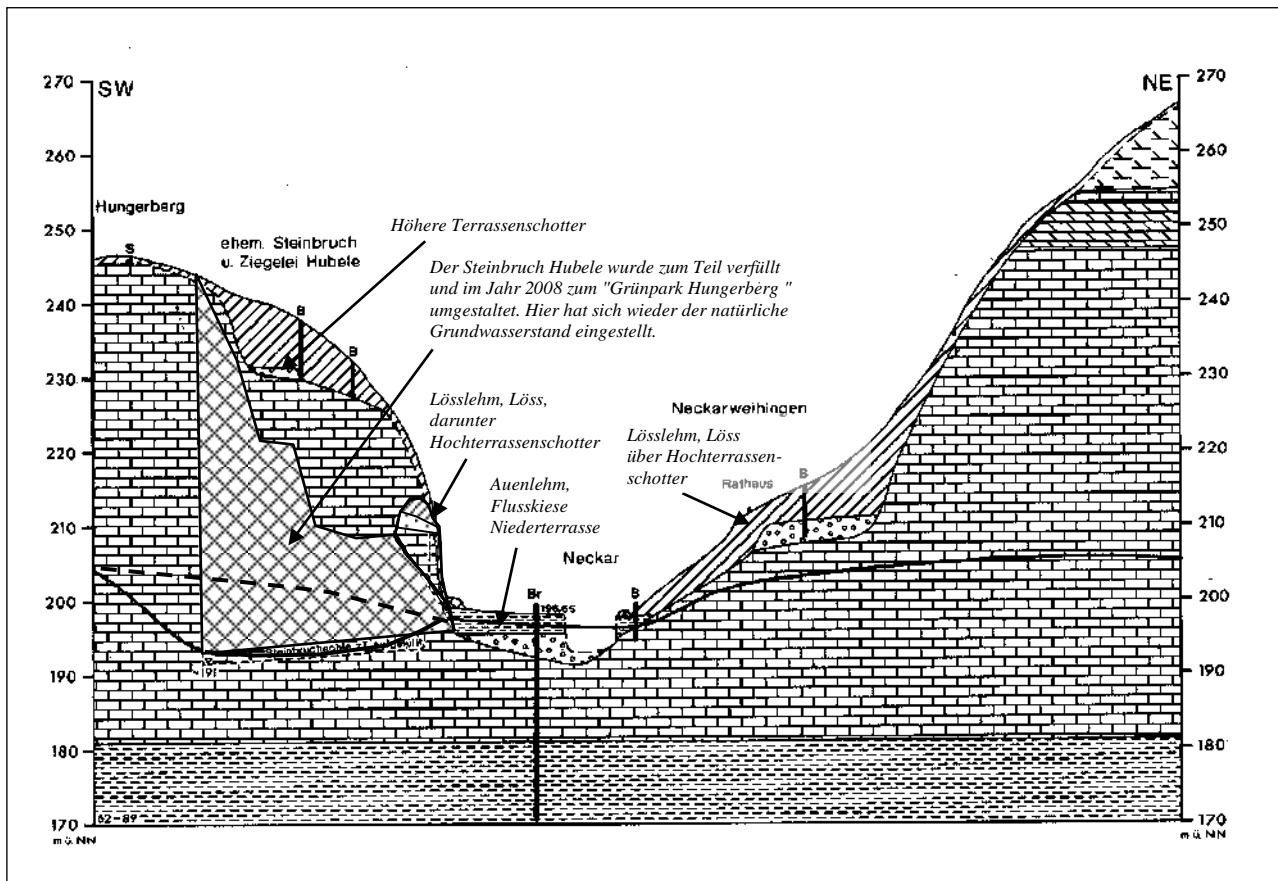
Bearbeitung: Dr. H. Krause, LGRB-BW, 1989; Dr. W. Goos, Stadt Ludwigsburg, 2018.

Alle Angaben und Daten ohne Gewähr. Die dargestellten Verläufe der Schichtgrenzen und die Grundwasserführung in den Gesteinen wurden durch Interpolation von Stichpunkten erstellt. Jahreszeitliche Abweichungen sind möglich. Es kann vorkommen, dass in Grundwasserleitern auch tiefe Bohrungen trocken bleiben oder wenig Wasser liefern, weil gering grundwasserleitende Schichten, z.B. Tone, Tonsteine, angetroffen wurden oder weil keine grundwasserführenden Kluftkörper oder nur kleine Klüfte angebohrt wurden. Ebenso kann es unter bestimmten geologisch-tektonischen Bedingungen, z.B. in Muldenlage und bei Verkarstung, zu unerwartet hohen Grundwasserdargeboten kommen.

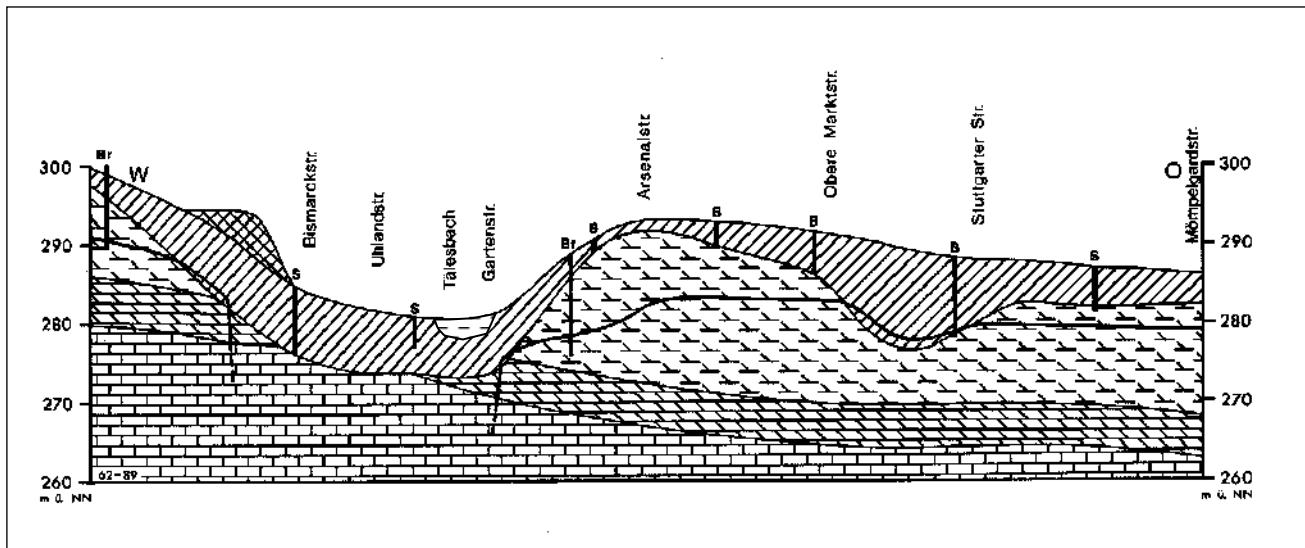
Die Lage der Schnittlinien I - IV ist in der Baugrundkarte in Kapitel 8 eingezeichnet.



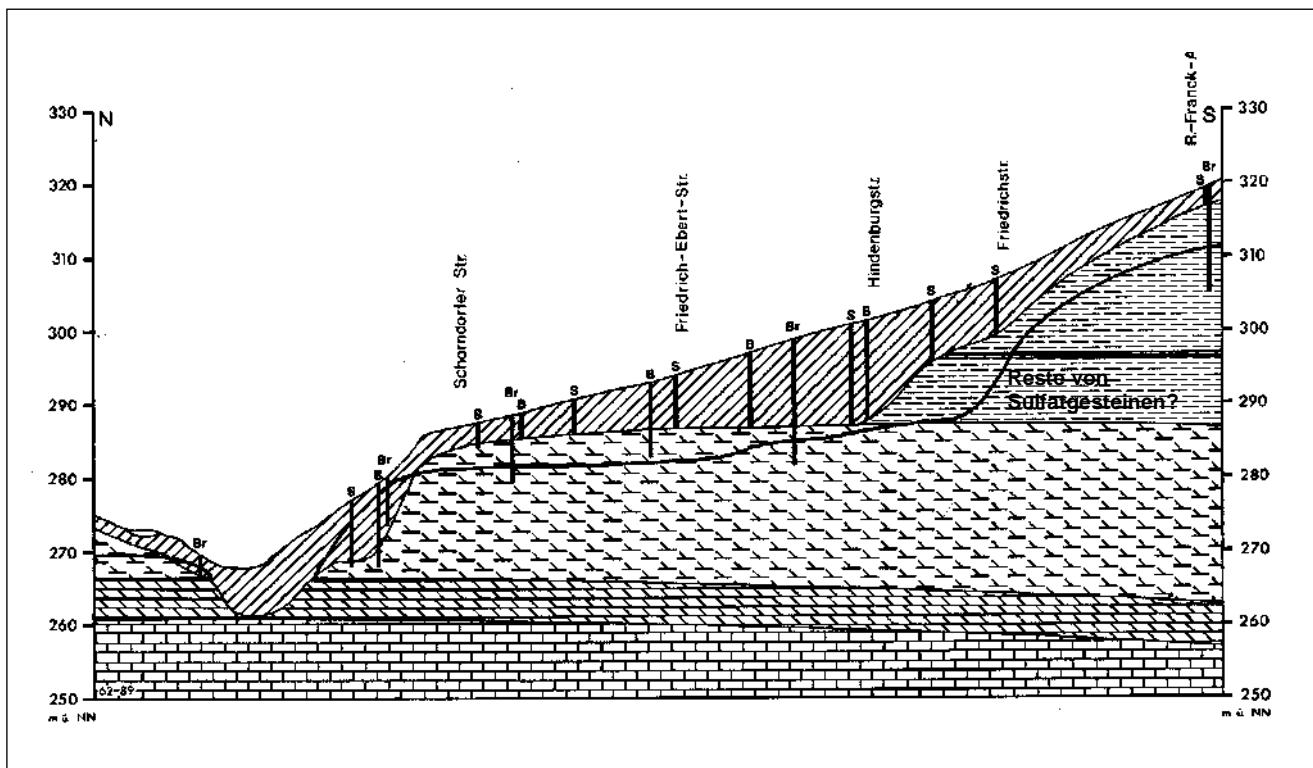
Beilage 6: Profilschnitt III, Hungerberg - Neckarweihingen



Beilage 7: Profilschnitt I, Ulrichstraße – Schorndorfer Straße

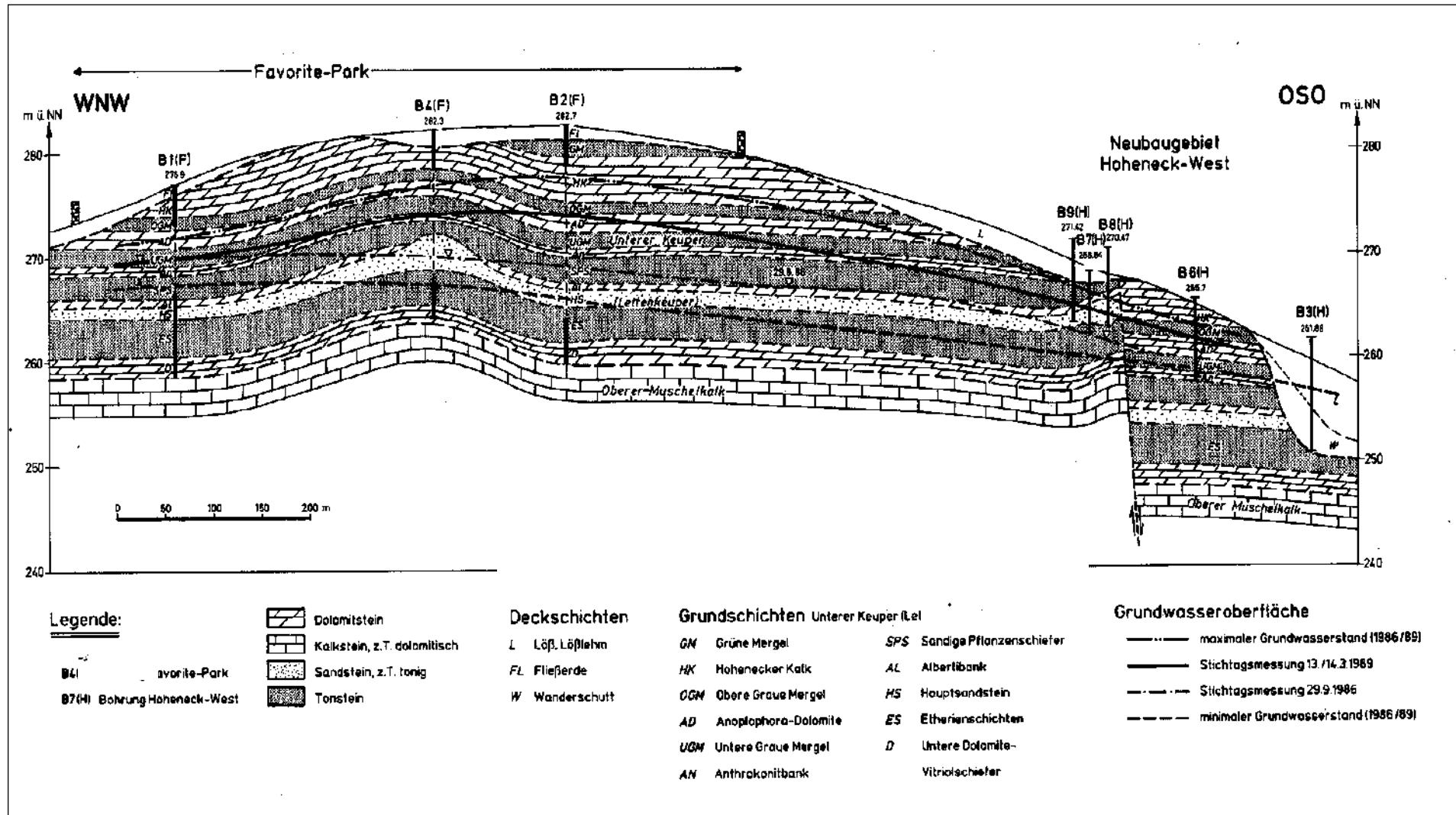


Beilage 8: Profilschnitt II, Alt-Würtemberg-Allee



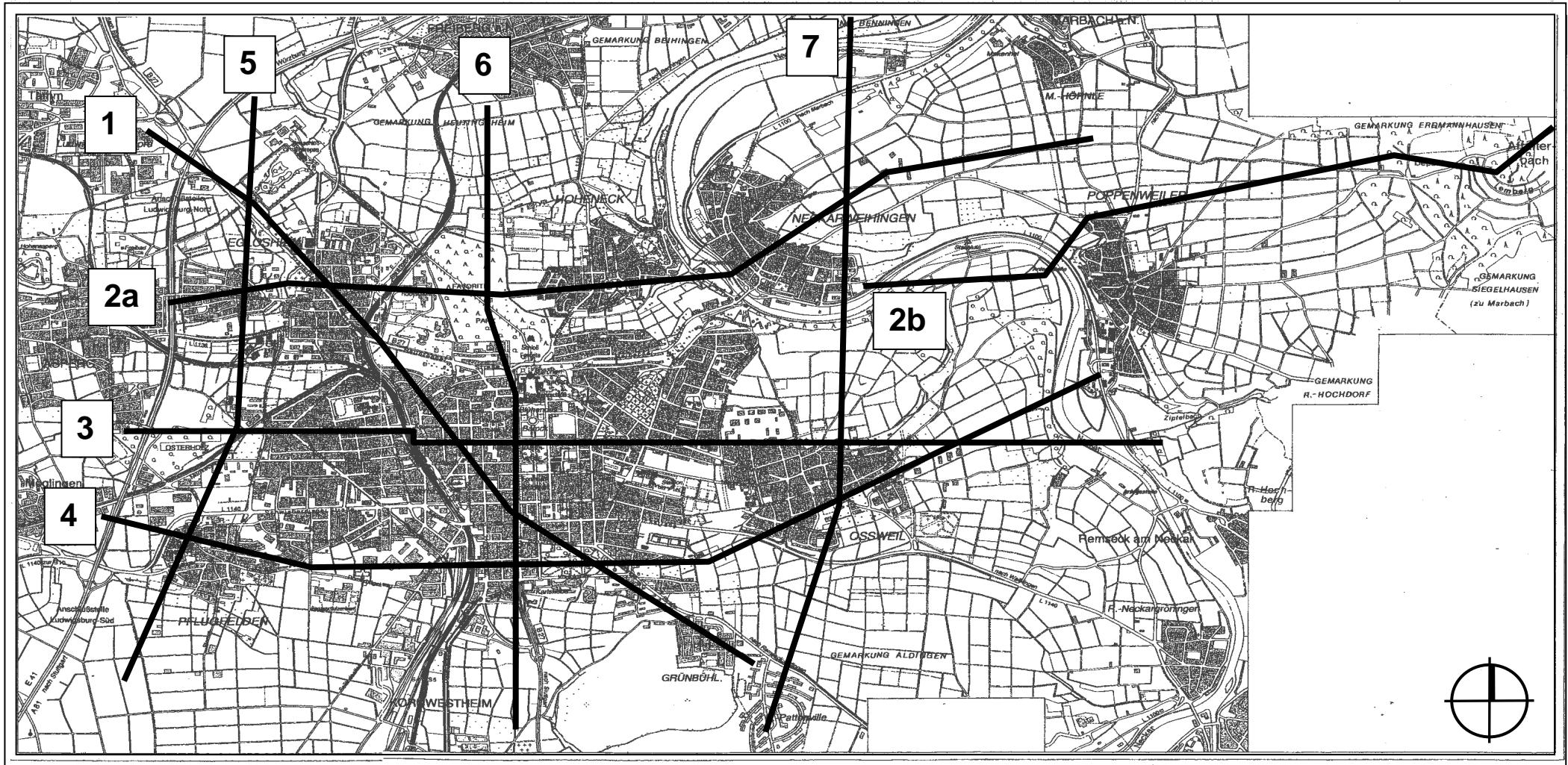
Beilage 9: Profilschnitt IV, Favoritepark – Hoheneck-West

Quelle: Gutachten des LGRB-BW 1988 zu den Grundwasserverhältnissen im Favoritepark.
Alle Angaben ohne Gewähr.

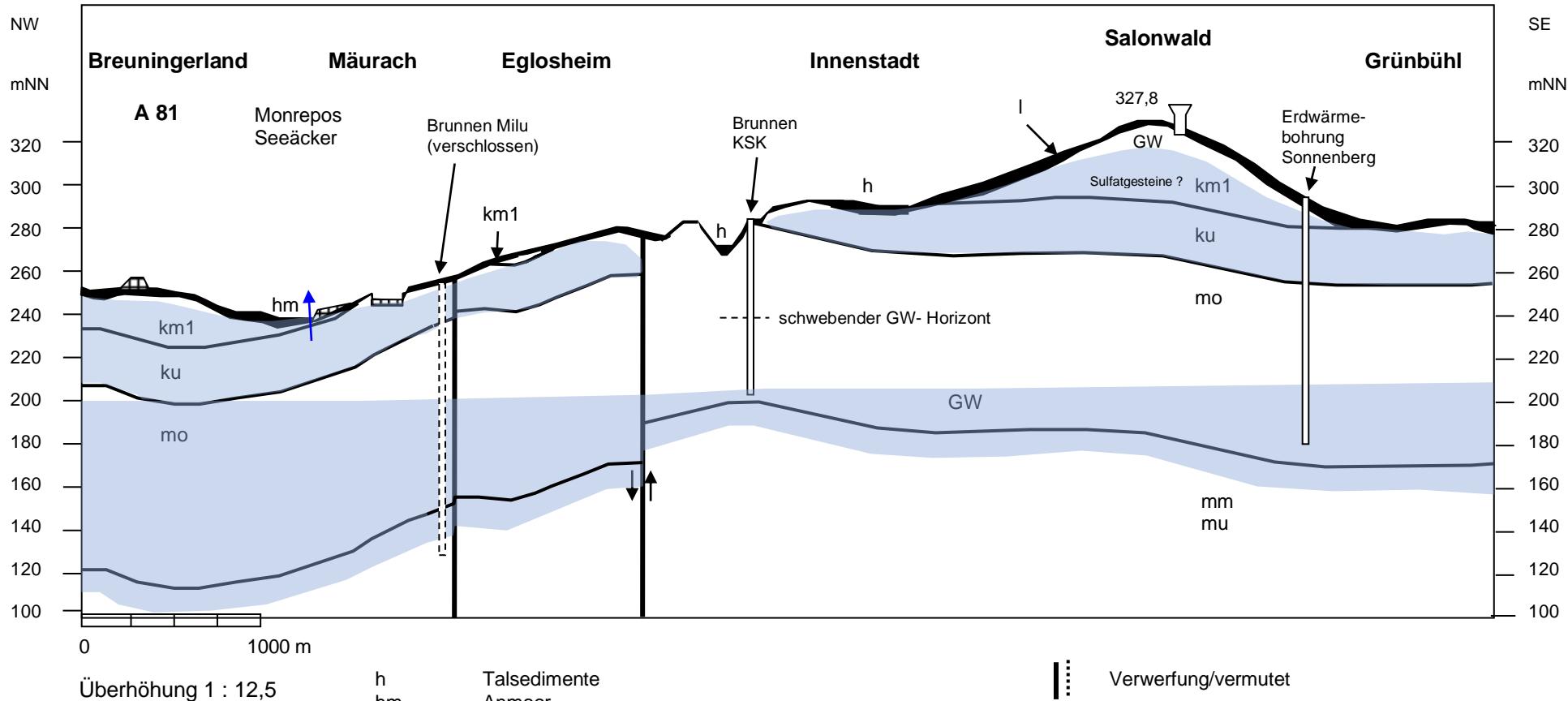


Beilage 9a: Übersicht und Lage der geologisch – hydrogeologischen Profilschnitte 1 - 7 in Ludwigsburg.

Alle Angaben ohne Gewähr.



Schnitt 1
Geologisch – hydrogeologischer Profilschnitt Breuningerland - Ludwigsburg-Grünbühl



Überhöhung 1 : 12,5

h
hm

I
km1

ku
mo

mm, mu

GW

Talsedimente
Anmoor

Lüsslehm, Löss, Wanderschutt/Fließerde, Hangschutt
Gipskeuper

Lettenkeuper
Oberer Muschelkalk

Mittlerer- und Unterer Muschelkalk

Grundwasserhorizonte

Austritte gespannten Grundwassers

Verwerfung/vermutet

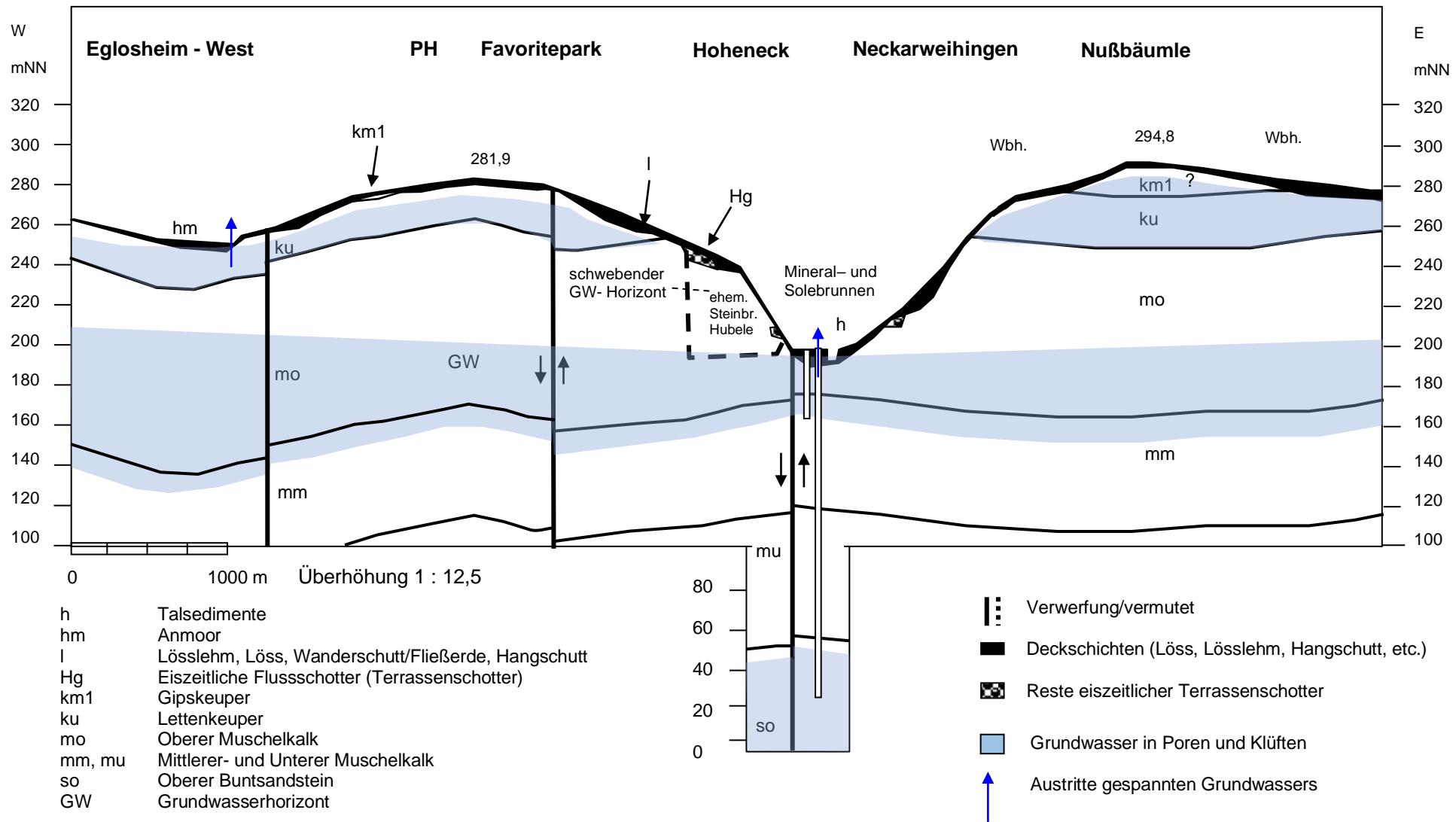
Deckschichten (Lüsslehm, Löss, Hangschutt, etc.)

Auffüllung

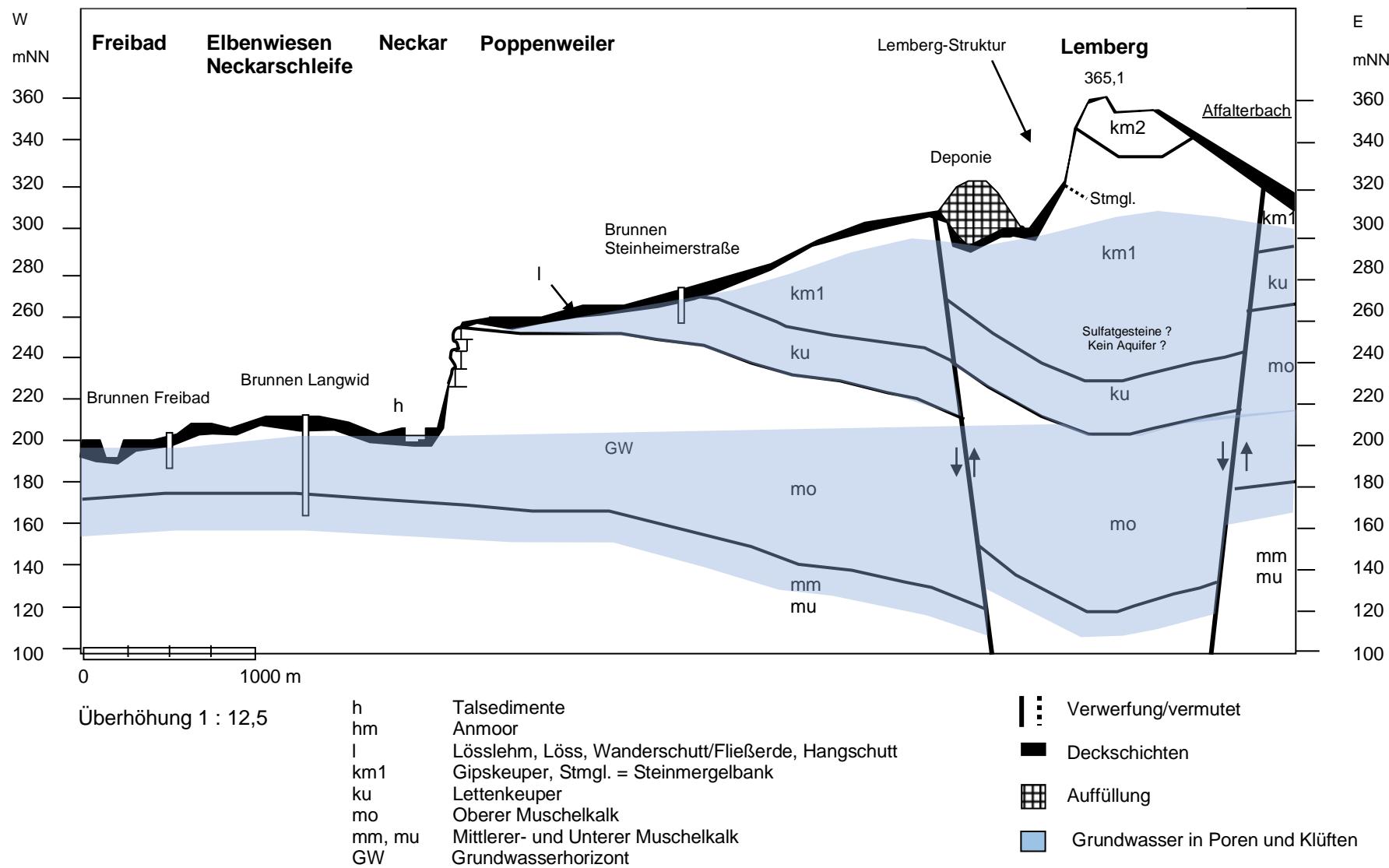
Grundwasserhorizonte

Deckschichten (schwarz) und Gesteinsbereiche mit einer mehr oder weniger starken Grundwasserführung in Poren und Klüften. Im schichtigen Kluftgrundwasserleiter des Lettenkeupers wechseln wasserdurchgängige mit weniger wasserdurchgängigen und mit stauenden Horizonten. Im Oberen Muschelkalk können schwabende Grundwasserhorizonte über Tonmergelfugen vorkommen. Eingeschränkte Grundwasserdurchlässigkeit im Bereich der Haßmersheimer Mergel im mo.

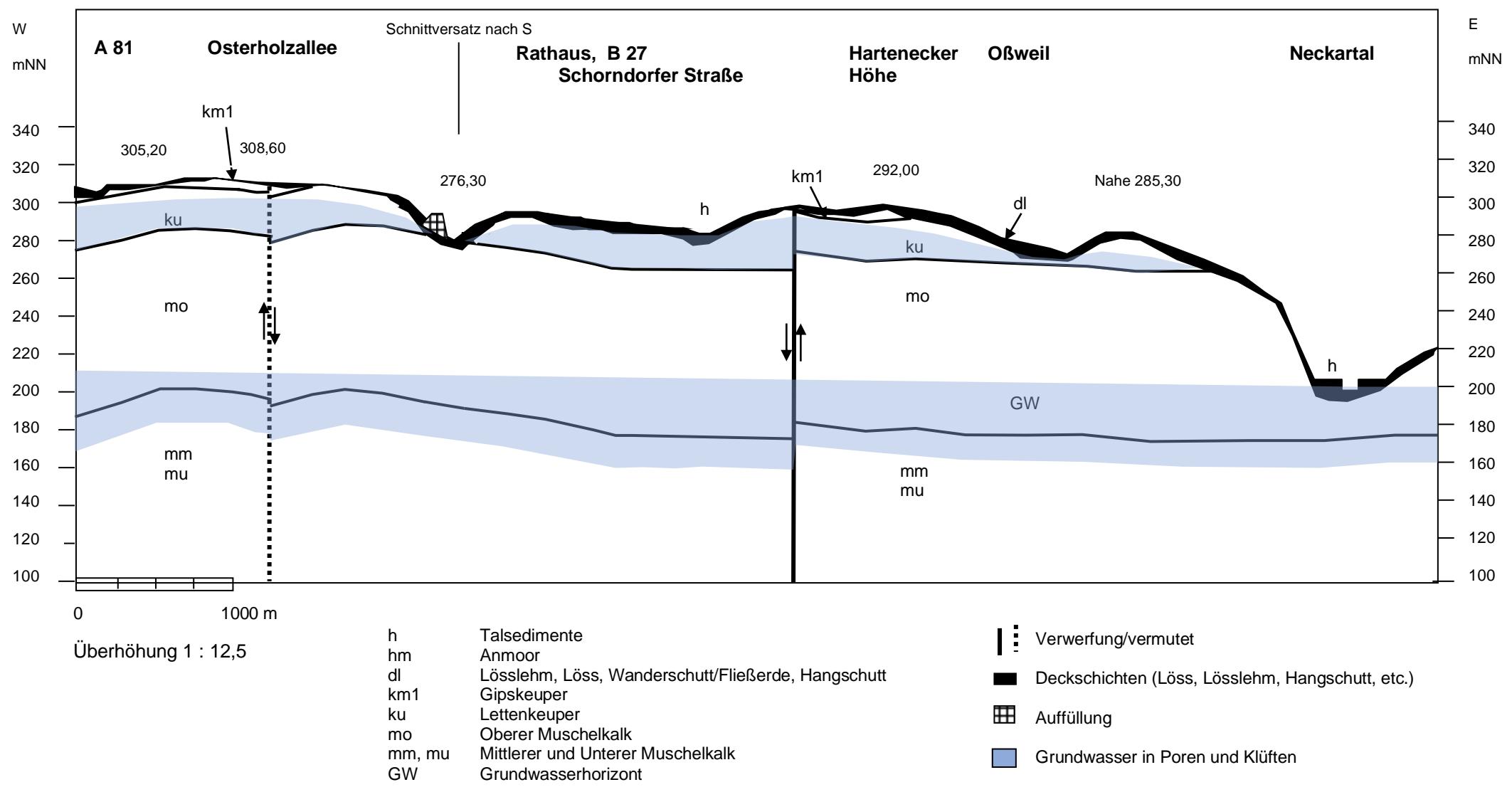
Schnitt 2a
Geologisch – hydrogeologischer Profilschnitt Ludwigsburg-Eglosheim - Lbg.-Neckarweihingen



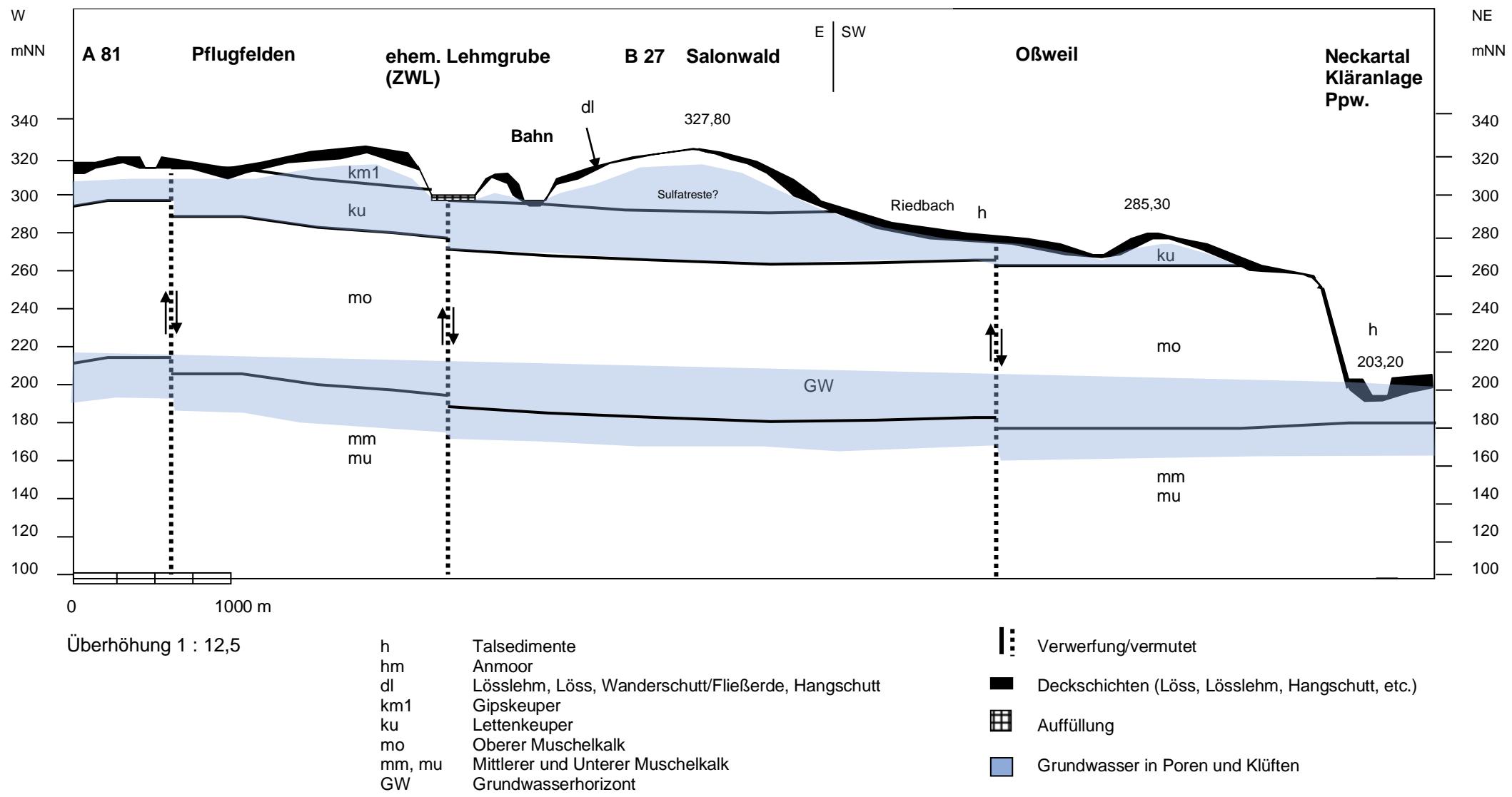
Schnitt 2b
Geologisch – hydrogeologischer Profilschnitt Freibad Ludwigsburg-Hoheneck - Lemberg



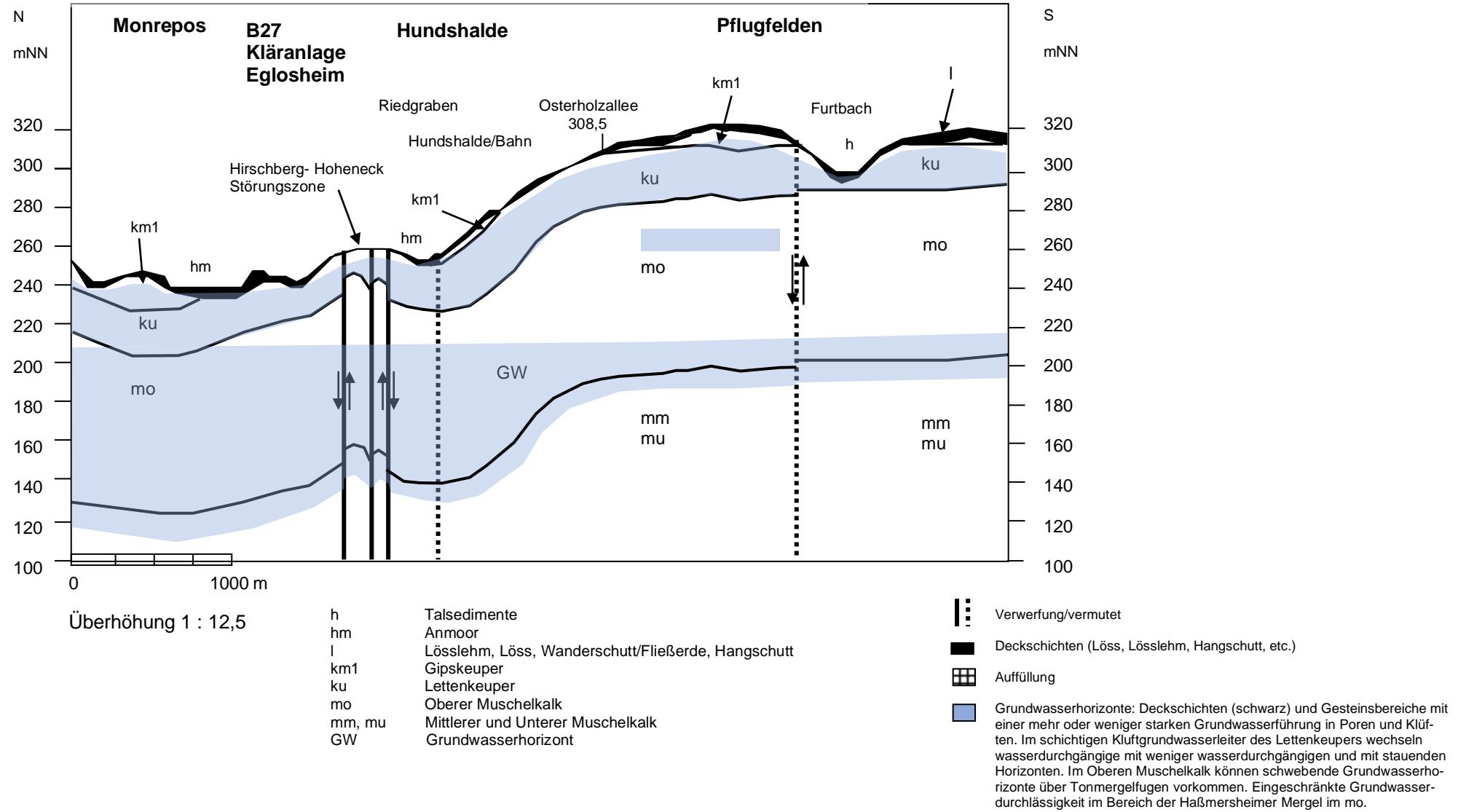
Schnitt 3
Geologisch – hydrogeologischer Profilschnitt Osterholz - Neckartal



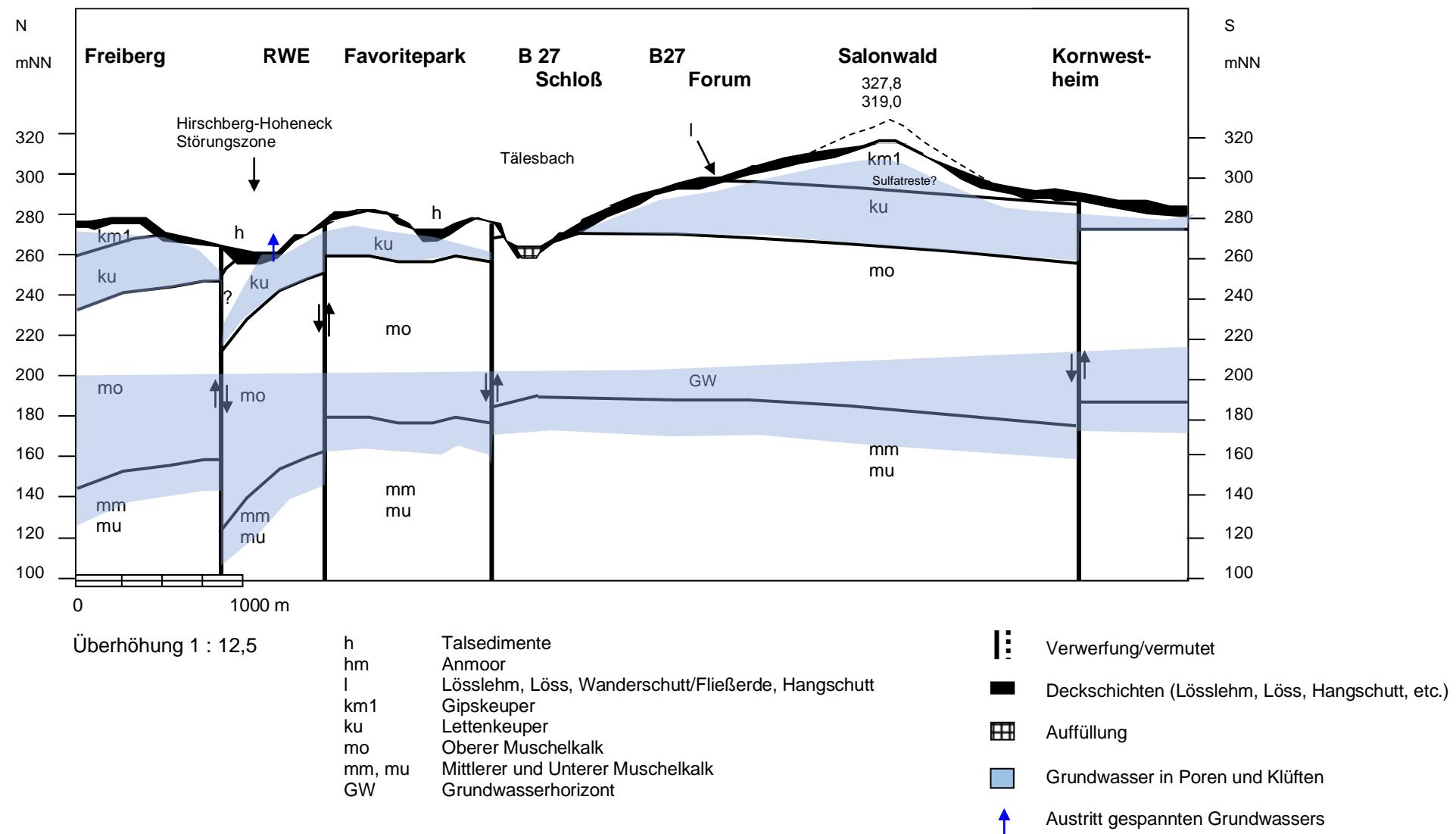
Schnitt 4
Geologisch – hydrogeologischer Profilschnitt Ludwigsburg-Pflugfelden - Neckartal



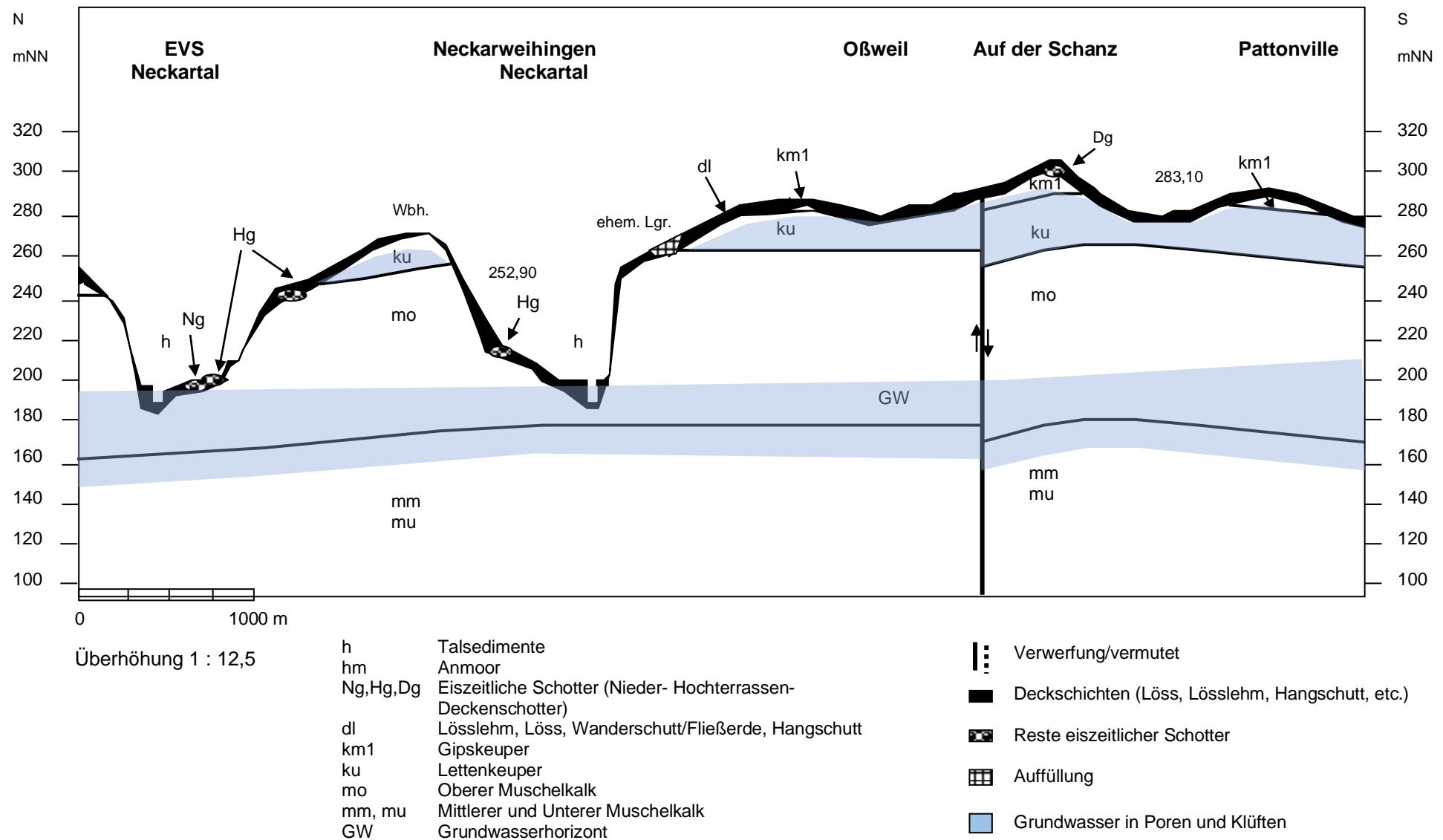
Schnitt 5
Geologisch – hydrogeologischer Profilschnitt Monrepos – Ludwigsburg-Pflugfelden



Schnitt 6
Geologisch – hydrogeologischer Profilschnitt Freiberg a.N. - Kornwestheim



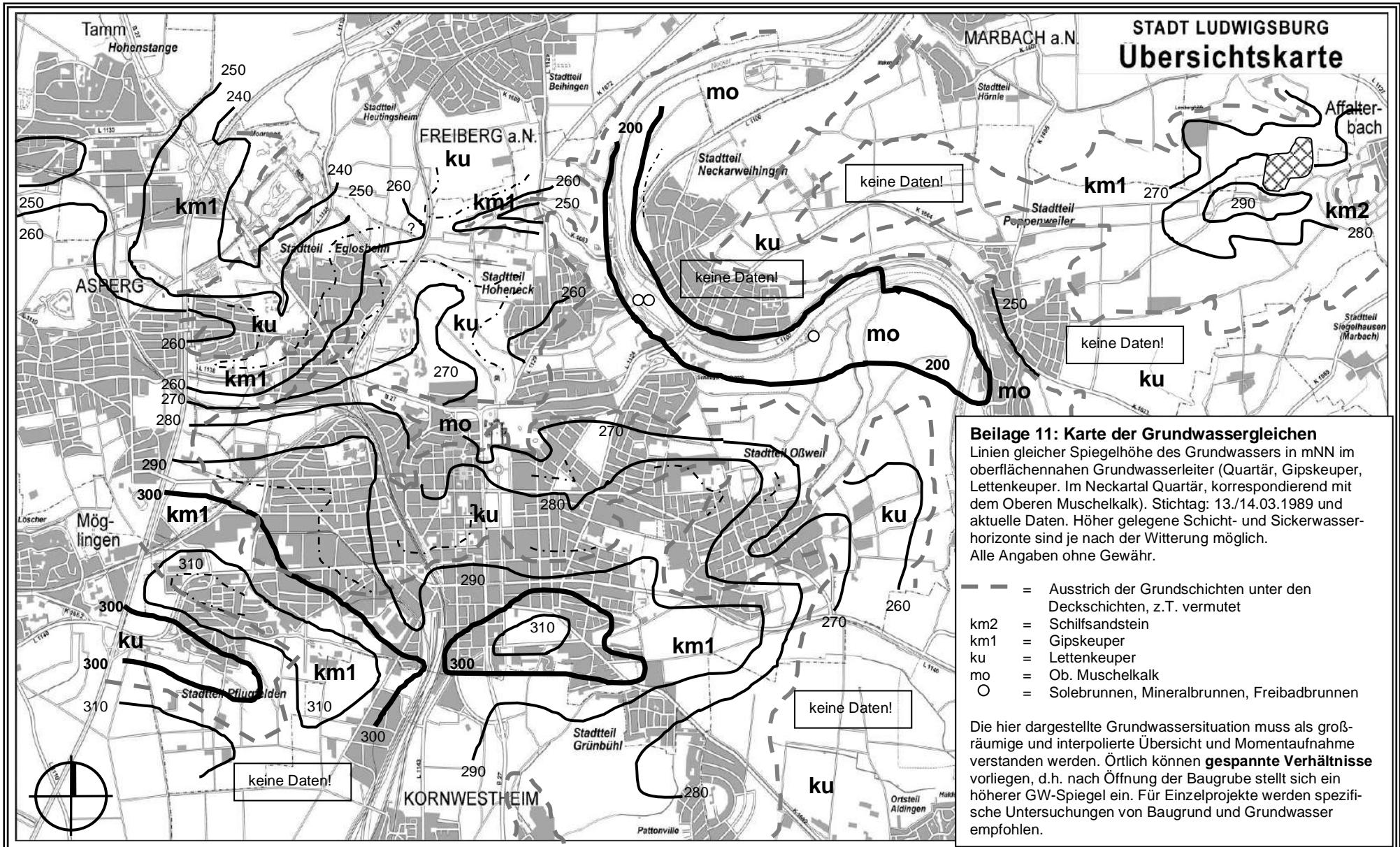
Schnitt 7
Geologisch – hydrogeologischer Profilschnitt EVS/Neckartal – Ludwigsburg-Oßweil - Pattonville

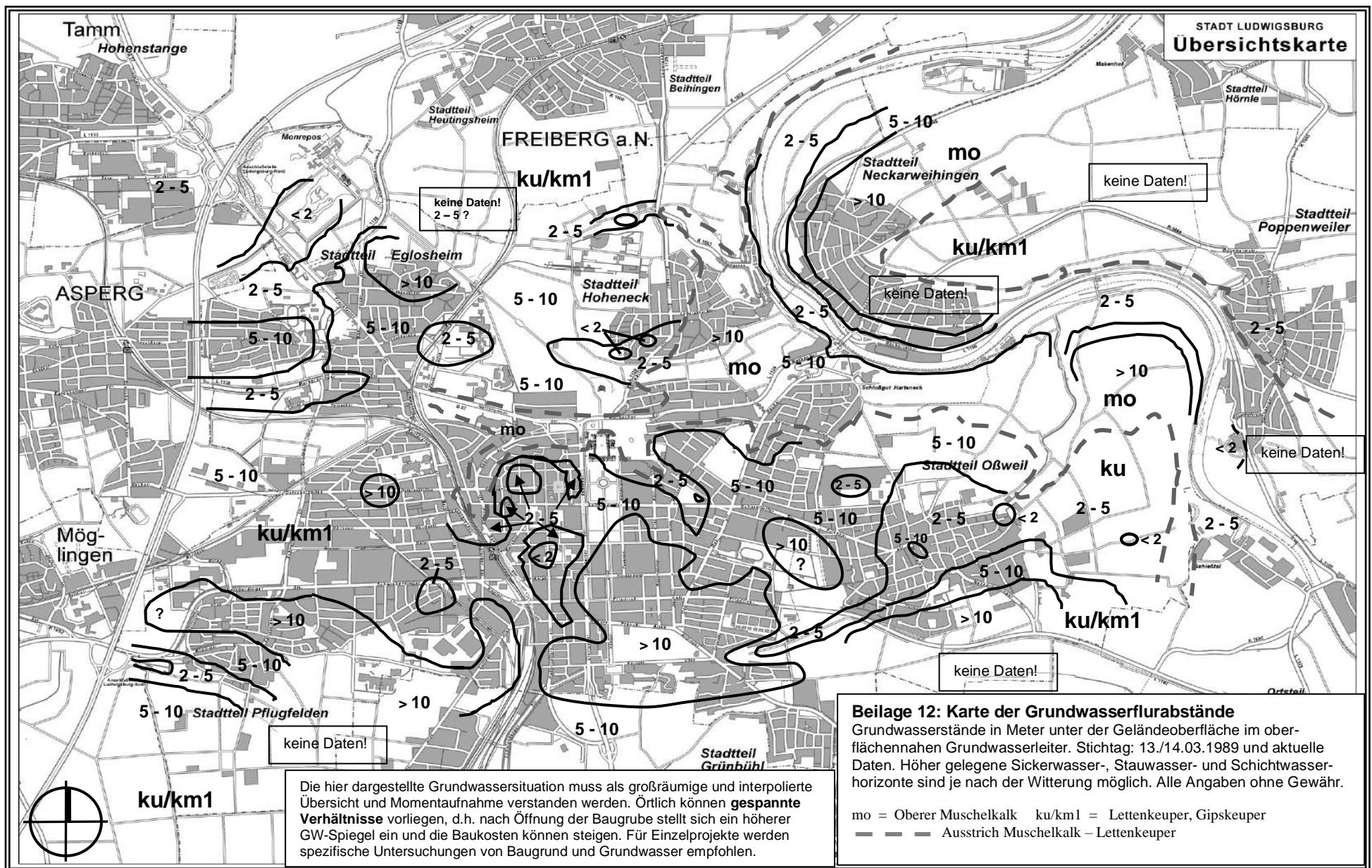


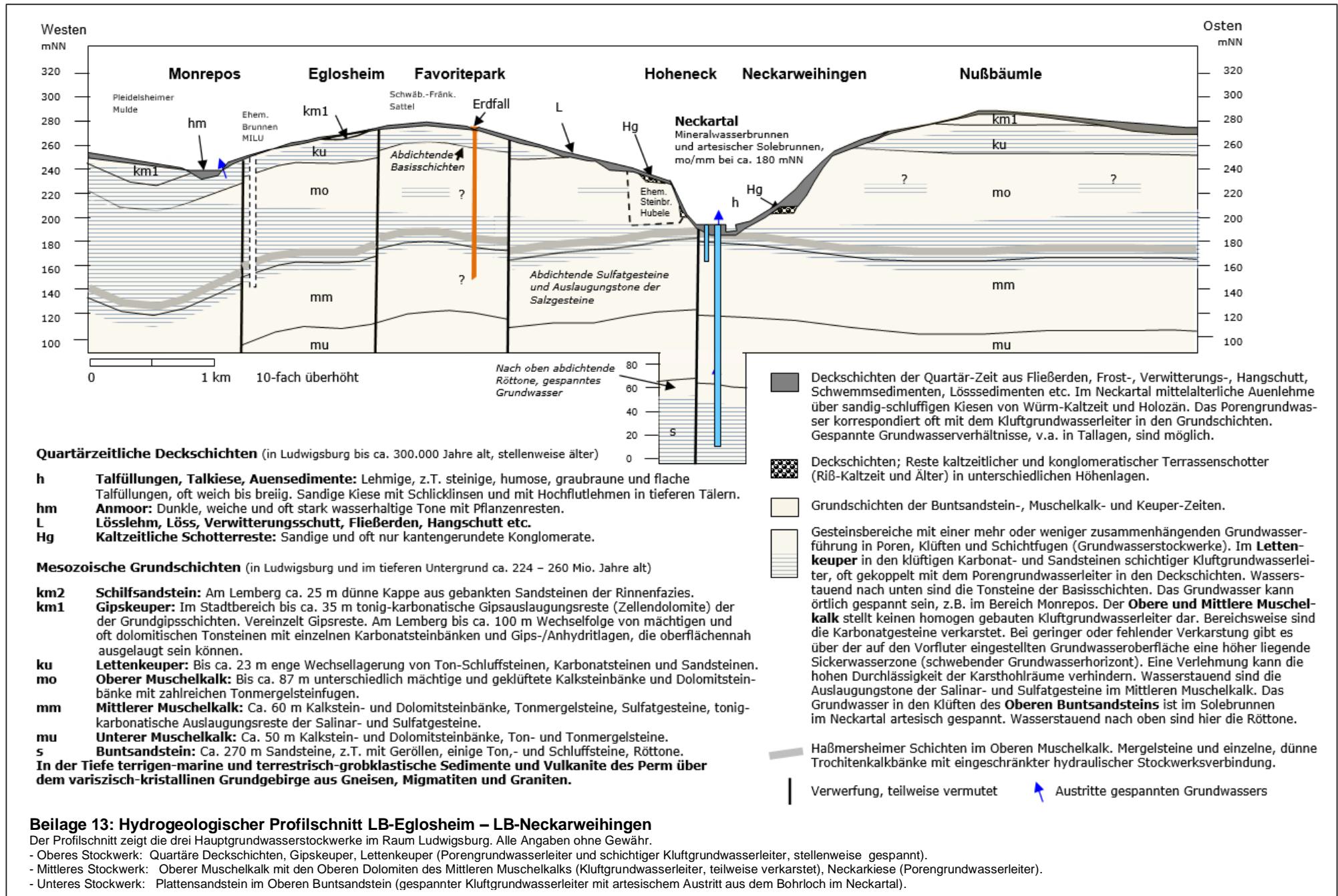


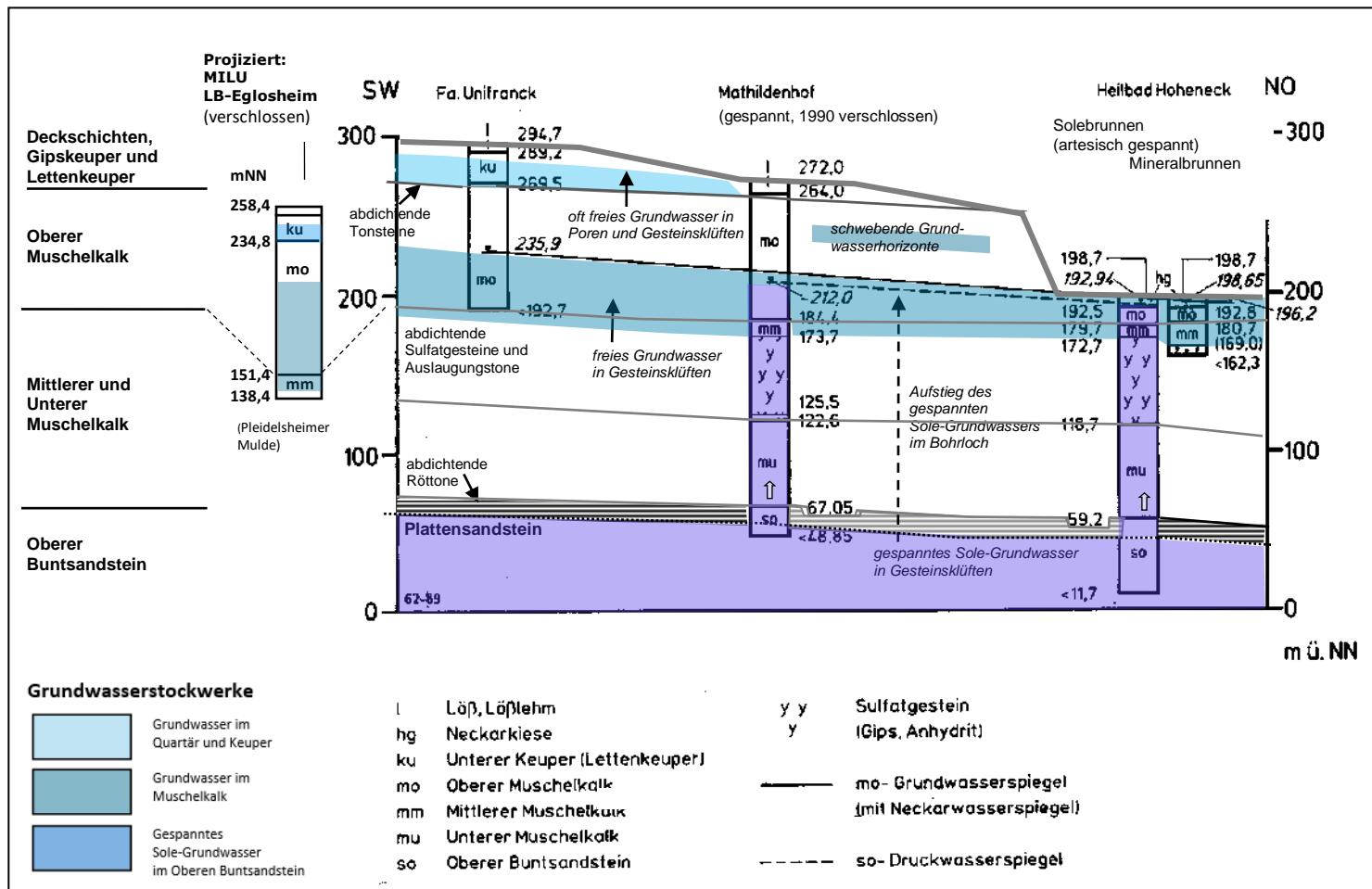
Beilage 10: Übersichtskarte der Mächtigkeiten der Deckschichten (siehe detaillierte Karten in Kap. 8)

Innerhalb der grauen Bereiche können die Mächtigkeiten der Deckschichten weniger als 2 m betragen. In den gelben Bereichen können die Mächtigkeiten der Deckschichten mehr als 2 m, oft 5 - 8 m und auch über 8 m betragen. Die Darstellung beruht auf der Interpolation vieler Messpunkte. Abweichungen sind möglich. Genauere Daten zur Mächtigkeiten der Deckschichten sind in der Baugrundgeologischen Karte M 1 : 10 000 eingezeichnet (siehe Kap. 8). Die nordöstlichen Bereiche der Gemarkung wurden noch nicht untersucht. Alle Angaben ohne Gewähr.









Beilage 14: Hydrogeologischer Profilschnitt der Tiefbohrungen in Ludwigsburg

Die fünf dargestellten Bohrungen wurden zu Brunnen ausgebaut und dienen der Gewinnung von Brauchwasser, Trinkwasser und Heilwasser. In den Brunnen sind die oft ungespannten (freien) Grundwasserstände im Quartär/Lettenkeuper (oberes Grundwasserstockwerk) und im Oberen Muschelkalk zusammen mit den Oberen Dolomiten des Mittleren Muschelkalks (mittleres Grundwasserstockwerk) dargestellt. Die zugehörigen Grundwasserkörper mit Poren und Klüften sind hellblau dargestellt. Das Grundwasser im klüftigen Oberen Buntsandstein (unteres Grundwasserstockwerk) ist blau dargestellt. Es ist gespannt, d.h. es steht unter Druck und im Neckartal unter artesischem Druck, weil die Schichten des Oberen Buntsandsteins und die Spiegelhöhe des Grundwassers im Versickerungsgebiet am Ostrand des Nordschwarzwaldes mit über 400 mNN deutliche höher liegen, als die Ausflusskante mit 193 mNN im Neckartal. Die abdichtenden Röttonen an der Grenze zum Unteren Muschelkalk verhindern den Druckausgleich nach oben. Das Grundwasser im Oberen Buntsandstein wurde im Bereich der punktierten Linie im Neckartal und im Mathildenhof angebohrt und steigt in den Bohrlöchern bis auf das mit gestrichelter Linie dargestellte Niveau an. Die dargestellten Verläufe der Schichtgrenzen und die Grundwasserführung in den Gesteinen wurden bei allen Darstellungen und Beschreibungen dieser Publikation durch Interpolation von Stichpunkten erstellt. Abweichungen sind möglich.

Alle Angaben sind ohne Gewähr.

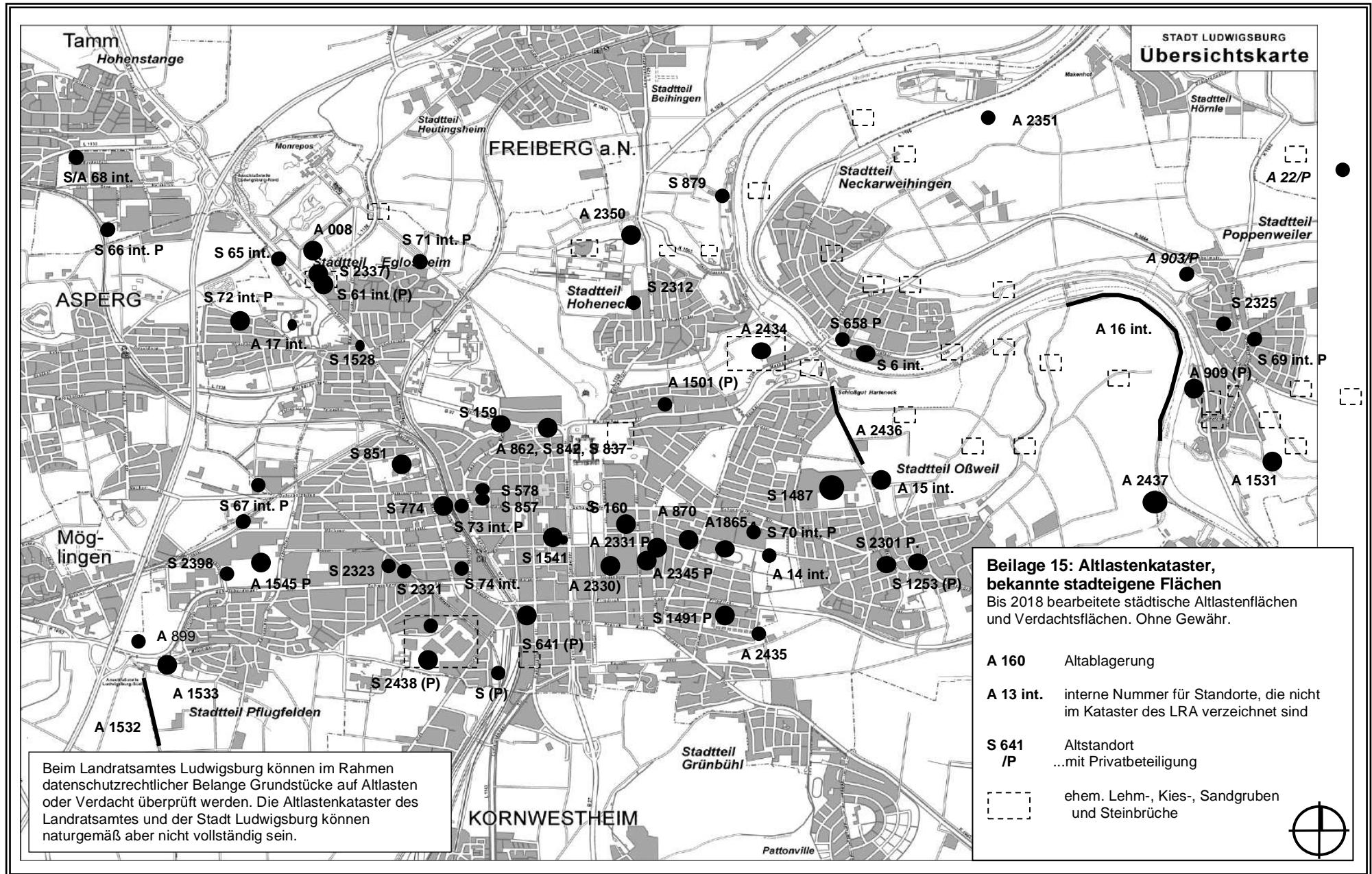
Grafik ergänzt aus: Der Baugrund in Ludwigsburg. H. Krause, LGRB-BW & A. Wenninger, Stadt Ludwigsburg, 1990.

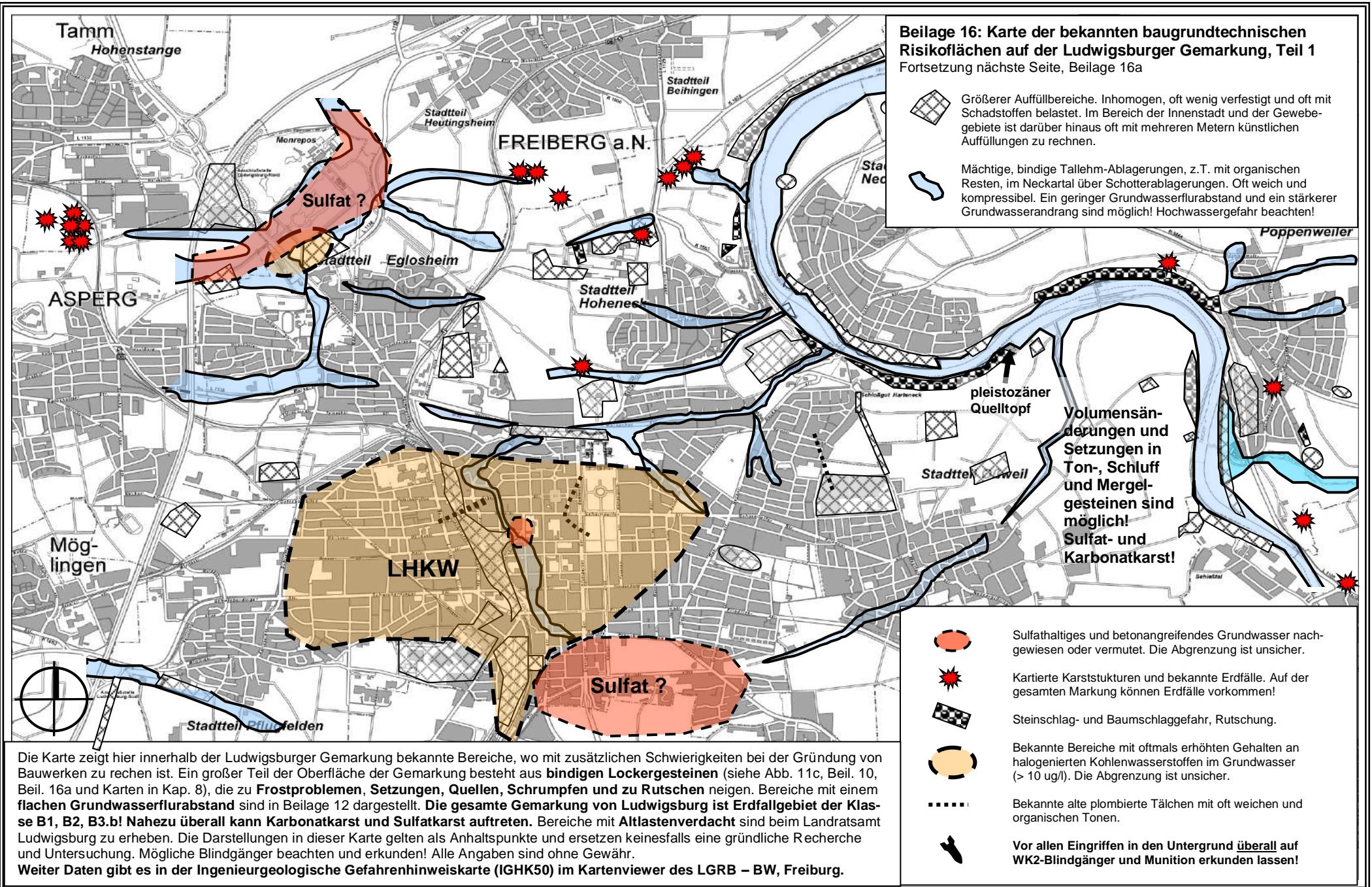
Die Durchlässigkeit (k_f = Durchlässigkeitsbeiwert, tatsächlicher Wasserfluss im Boden) der Kluftgrundwasserleiter hängt stark von deren tektonischer Beanspruchung und von einer Verkarstung der Karbonatgesteine ab und streut in den Kalksteinen des Mittleren und Oberen Muschelkalk zwischen $k_f = 10^{-1}$ und 10^{-4} m/s . Die Verkarstung des Oberen Muschelkalks beginnt spätestens nach der Eintiefung des Talsystems in die Unterkeuper-Schichten aber die Verlehmung der Karsthohlräume verhindert oft hohe Durchlässigkeiten. Die Ausstrichsbereiche des Oberen Muschelkalks und Bereiche an den Talrändern und Talsohlen sind stärker verkarstet, während Bereiche mit größerer Überdeckung weniger stark verkarstet sind. Die Grundwasserneubildungsrate im Oberen Muschelkalk mit örtlicher Lettenkeuperüberdeckung liegt bei $5 - 10 \text{ l/s je km}^2$ und bei geschlossener Bedeckung mit Lettenkeuper und mit ausgelaugtem Gipskeuper bei $1,5 - 3 \text{ l/s je km}^2$. Im Keuperbergland verhindert der unausgelaugte Gipskeuper zusammen mit unverwitterten Tonsteinen die Grundwasserneubildung im Muschelkalk. Kein Gestein ist vollkommen wasserdicht! Tone haben einen Durchlässigkeitsbeiwert von ca. $10^{-8 \text{ bis } -11} \text{ m/s}$. Auf einer Fläche von 1 m^2 sickert in einer Sekunde ein Tropfen durch.

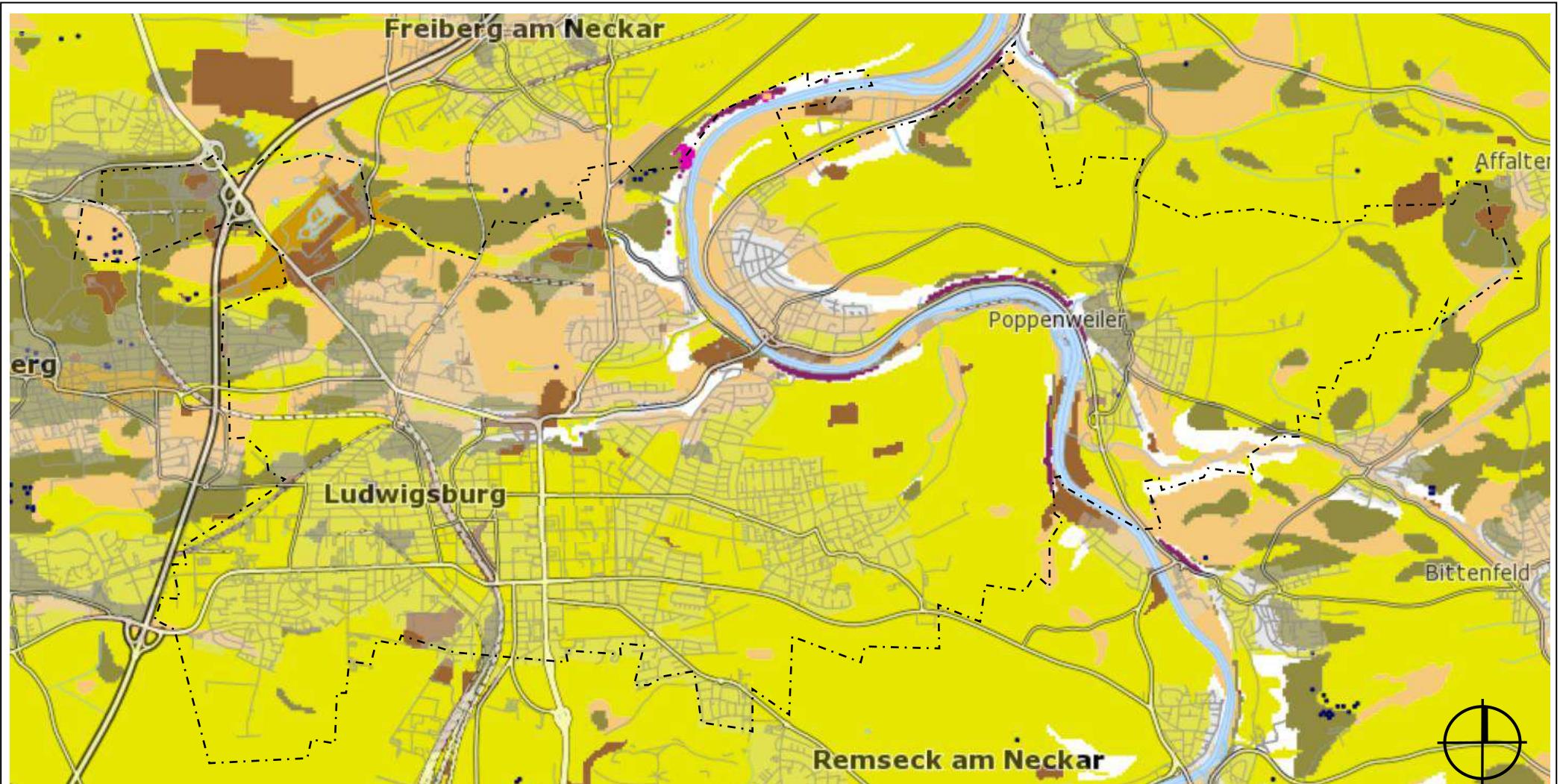
Durchlässigkeitsbeiwert k_f in m/s	Durchlässigkeitsbereich nach DIN	Bodenart
$> 10^{-2}$	sehr stark durchlässig	Grobkies, Geröll
$10^{-2} \text{ bis } 10^{-4}$	stark durchlässig Feinkies	Feinkies, Grobsand
$10^{-4} \text{ bis } 10^{-6}$	durchlässig	Feinsand, Sand lehmig oder schluffig
$10^{-6} \text{ bis } 10^{-8}$	schwach durchlässig	Löß, Schluff
$< 10^{-8}$	sehr schwach durchlässig	Lehm, schluffiger Lehm, Ton

Durchlässigkeit

Es kann vorkommen, dass in Festgestein-Grundwasserleitern, v.a. in Kluft- und Karstgrundwasserleitern (Oberer Muschelkalk), auch tiefe Bohrungen trocken bleiben oder wenig Wasser liefern, weil kein grundwasserführendes Kluftsystem oder nur kleine Klüfte angebohrt wurden oder weil die Karsthohlräume verlehmt sind. Durch geotektonische Besonderheiten kann es auch in an sich grundwasserarmen Schichten zu einem erheblichen Grundwasserandrang kommen. Vor Bauvorhaben wird immer eine geotechnische und hydrogeologische Begutachtung empfohlen.







Gefahr von Setzungen und Hebungen
aufgrund von jahreszeitlichen Volumen-änderungen.



Setzungsgefahr aufgrund organischer,
kompressibler Lockergesteine.



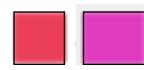
Setzungsgefahr aufgrund bindiger,
kompressibler Lockergesteine.



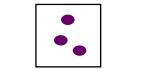
Uneinheitliches Setzungsverhalten aufgrund
anthropogener Auffüllungen



Veränderlich feste Gesteine vorhanden,
v.a. im Lettenkeuper.



Rutschungsgebiete nach geologischer
Karte und nach Fernerkundung.



Bekannte und digital karte
Karststrukturen.



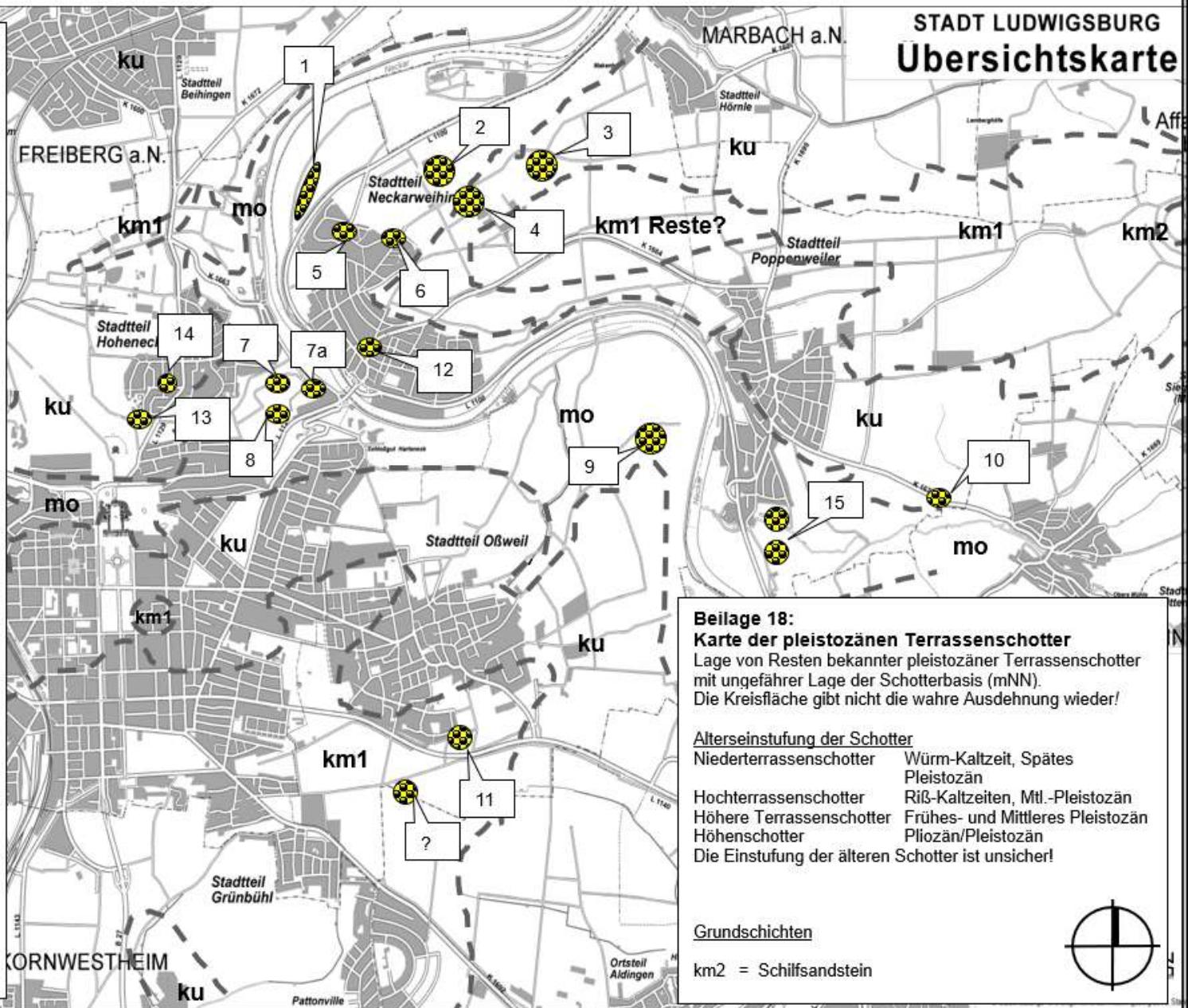
Potenzielle Ausbruchgebiete für Steinschlag
und Felssturz.

Beilage 16a: Karte der bekannten baugrundtechnischen Risikoflächen auf der Ludwigsburger Gemarkung, Teil 2

Quelle: Kartenviewer des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), Baden-Württemberg,
Ingenieurgeologische Gefahrenhinweiskarte (IGHK50).

STADT LUDWIGSBURG Übersichtskarte

- 1 "Neckartal" Niederterrassenschotter der Würm-Kaltzeit, ca. 200 m über Talaue und Hochterrassenschotter der Riß-Kaltzeit ca. 206 m
- 2 Gewann "Gschnait" Höhere Terrassenschotter bei ca. 240 mNN
- 3 Gewann "Hörnle" Höhere Terrassenschotter bei ca. 260 mNN
- 4 Gewann "Gschnait" Höhere Terrassenschotter bei ca. 252 mNN
- 5 "Sudetenring" Höhere Terrassenschotter bei ca. 225 mNN
- 6 "Beuzlen" Höhere Terrassenschotter bei ca. 242 mNN
- 7 "Steinbruch Hubele" Höhere Terrassenschotter bei ca. 227 mNN
- 7a Hochterrassenschotter bei ca. 210 mNN
- 8 Oberhalb "Steinbruch Hubele" Höhere Terrassenschotter bei ca. 240 mNN
- 9 Gewann "Knöpfle" Höhere Terrassenschotter bei ca. 240 mNN
- 10 "Hochdorfer Weg" Höhere Terrassenschotter mit Travertin bei ca. 242 mNN
- 11 "Auf der Schanz" Höhenschotter bei ca. 300 mNN
- 12 "Rathaus" Hochterrassenschotter bei ca. 209 mNN
- 13 "Heiligenäcker" Höhere Terrassenschotter bei ca. 246 mNN
- 14 "Hackstraße" Höhere Terrassenschotter bei ca. 248 mNN
- 15 "Südlich Poppenweiler" Hochterrassenschotter bei ca. 215 mNN. Die Lage ist nicht genau bekannt.



Beilage 19: Die chemische Zusammensetzung der Grundwässer in Ludwigsburg

Bezeichnung	Sole-	Mineral-	Brunnen	Brunnen	Brunnen 2	Pegel	Brunnen	Brunnen	Brunnen	Pegel Klei-	Pegel
LFU- Nr.	brunnen Heilbad Hoheneck 0182/510	wasser- brunnen Hoheneck 0181/510	Stadtbad Innenstadt 1134/510	Freibad Neckartal 0187/510	Eloxalwerk Neckarwh. Buchner Str. 41,5	Schiller- platz 1131/511	Obere Reithaus- straße 0277/510	Wilhelm- straße 31 1135/511	Wette- markt Öfweil 1156/511	nes Feldle Pflugfelden 4504/461	Flattich- straße Hoheneck 0322/510
Tiefe m u. Gelände	177,0	34,4				11,46	18,0	6,7	9,5	17,3	14,93
Grundwasserstockwerk	Buntsandstein	Oberer- Mittlerer Muschelkalk	Letten- keuper	Oberer Mu- schelkalk	Oberer- Mittlerer Muschelkalk	Lettenkeuper	Lettenkeuper	Letten- keuper	Letten- keuper	Letten- keuper	Letten- keuper
Datum der Probenahme	2009	2009	2009	2009	2009	2009	2009	2009	2009	2007	2009
pH-Wert Grenzwert pH 6,5 – 9,5	6,45**	6,97	6,98	7,05	7,1	7,33	7,56	7,3	7,5	6,9	7,1
Gesamthärte mmol/l	20,26	7,69	41,6	34,8	57	36,9	22,9	41,9	28,8	35,3	27,2
Elektrische Leitfähigkeit (uS/cm) GW 2500 uS/cm	29700**	1370	1330	1090	1800	1620	1530	1850	1510	1160	880
Calcium Ca (mg/l)	700	239	124	188	320	171	132	164	142	184	126
Magnesium Mg (mg/l)	68	42	53	37	54	41	16	55	34	41	37
Natrium Na (mg/l) GW 200 mg/l	7800**	14	34	15	23	94	138	113	140	11	5,9
Kalium Ka (mg/l)	88	2,7	2,4	2,6	2,9	9,8	11	9,7	42	1,1	1,7
Chlorid Cl (mg/l) GW 250 mg/l	9600**	36	107	36	160	258*	263*	315*	226	38	20
Sulfat SO ₄ (mg/l) GW 240 mg/l	4600**	398**	259**	227**	380**	120	120	138	142	103	39
Nitrat NO ₃ (mg/l) GW 50 mg/l	1	25	41	28	25	43	106	33	10	50	36
Uran U (ug/l) (2013) GW 10 ug/l	80	2	3,2	1,3	-	-	-	-	-	-	-
Lfl. halogenierte Kohlen- wasserstoffe (7) (ug/l) GW 10 ug/l	< 1	3	41	1	< 1	52 2011: 1480 2012: 19	< 1	110	< 1	< 1	< 1
Pestizide Einzelsubst. (ug/l) GW 0,1 ug/l	< 0,01	< 0,01	0,2³	< 0,01	-	< 0,01	0,320¹ 0,307²	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Pestizide Summe (ug/l) GW 0,5 ug/l	< 0,01	< 0,01	0,3	< 0,01	-	< 0,01	0,749	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
KMnO ₄ Verbrauch (mg/l) GW 5 mg/l	1,0	1,0	1,1	1,0	< 5	2,8	3,3	1	3,9	3,8	2,9

GW = Grenzwert nach Trinkwasserverordnung, Fettschrift = Grenzwertüberschreitung - = nicht untersucht

* = Beeinflussung durch Streusalz. Die hohen Chloridwerte, verursacht durch Streusalz haben in den vergangenen Jahren wegen der vermehrte Streuung wieder zugenommen.

** = Geogen bedingte Salz- und Sulfatkonzentration im über 30.000 Jahre alten Hohenecker Heilwasser und im Oberen Muschelkalk.

Pestizide: 1 = Desethylatrazin, 2 = Atrazin, 3 = 2,6-Dichlorbenzamid

Grenzen Befahrbarkeit und Bearbeitbarkeit & Nomogramm

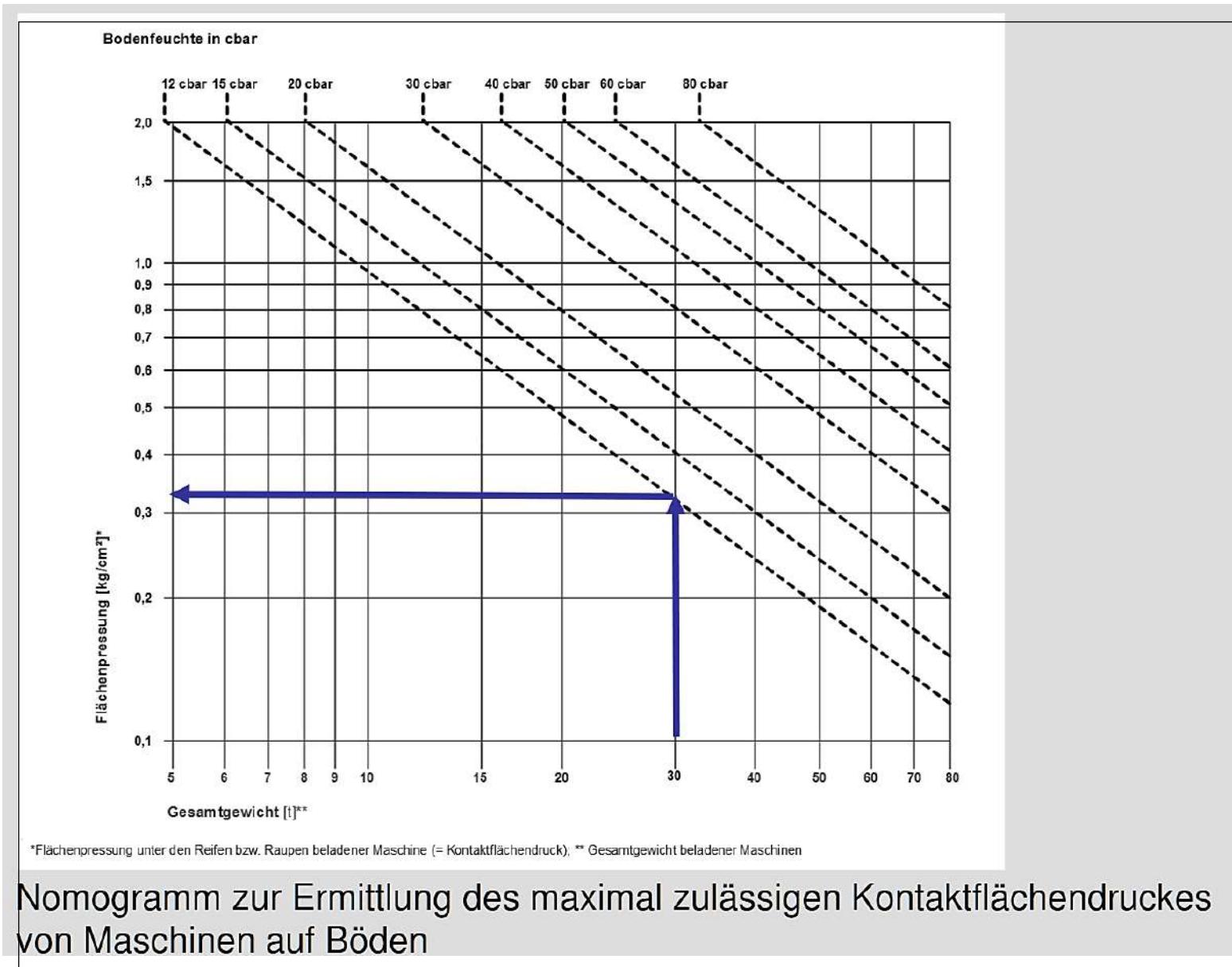
Konsistenzbereich		Bodenmerkmale bei geringer und mittlerer effektiver Lagerungsdichte		Bodenfeuchtezustand				Befahrbarkeit	Bearbeitbarkeit ²⁾	Verdichtbarkeit
Kurzzeichen	Bezeichnung	Zustand bindiger Böden (Tongehalt > 17 %)	Zustand nicht bindiger Böden (Tongehalt ≤ 17 %)	Wasserspannung pF-Bereich [lg hPa] [cbar] ¹⁾	Feuchtestufe Bezeichnung	Kurzzeichen				
ko1	fest (hart)	nicht ausrollbar und knetbar, da brechend; Bodenfarbe dunkelt bei Wasserzugabe stark nach	staubig; helle Bodenfarbe, dunkelt bei Wasserzugabe stark nach	> 4,0 > 4,0	> 990 990 bis > 50	trocken schwach feucht	feu1 feu2	optimal optimal	Bindige Böden: mittel bis ungünstig Nicht bindige Böden: optimal	gering
Schrumpfgrenze										
ko2	halbfest (bröckelig)	noch ausrollbar, aber nicht knetbar, da bröckelnd beim Ausrollen auf 3 mm Dicke; Bodenfarbe dunkelt bei Wasserzugabe noch nach	Bodenfarbe dunkelt bei Wasserzugabe noch etwas nach	4,0 bis > 2,7 4,0 bis > 2,7	990 bis > 50 > 12,4	schwach feucht feucht	feu2 feu3	optimal gemäß Nomogramm	optimal gemäß Nomogramm	mittel hoch
Ausrollgrenze										
ko3	steif (-plastisch)	ausrollbar auf 3 mm Dicke ohne zu zerbröckeln, schwer knetbar und eindrückbar, dunkelt bei Wasserzugabe nicht nach	Finger werden etwas feucht, auch durch Klopfen am Bohrer kein Wasseraustritt aus den Poren; dunkelt bei Wasserzugabe nicht nach	2,7 bis > 2,1 2,7 bis > 2,1	50 bis > 12,4 > 12,4	feucht feucht	feu3 feu4	gemäß Nomogramm nur auf Baustraßen und Baggermatten	gemäß Nomogramm nicht bearbeitbar, unzulässig	hoch hoch
ko4	weich (-plastisch)	ausrollbar auf > 3 mm Dicke, leicht eindrückbar, optimal knetbar	Finger werden deutlich feucht, durch Klopfen am Bohrer wahrnehmbarer Wasseraustritt aus den Poren	2,1 bis > 1,4 2,1 bis > 1,4	12,4 bis > 2,5 > 2,5	sehr feucht nass	feu4 feu5	nur auf Baustraßen und Baggermatten nur auf befestigten Baustraßen	nicht bearbeitbar, unzulässig nicht bearbeitbar, unzulässig	hoch extrem
ko5	breiig (-plastisch)	ausrollbar, kaum knetbar, da zu weich, quillt beim Pressen in der Faust zwischen den Fingern hindurch	durch Klopfen am Bohrer deutlicher Wasseraustritt aus den Poren, Probe zerfließt, oft Kernverlust	≤ 1,4 ≤ 1,4	< 2,5 < 2,5	nass feu5	feu5 feu6	nur auf befestigten Baustraßen nur auf befestigten Baustraßen	nicht bearbeitbar, unzulässig nicht bearbeitbar, unzulässig	extrem
Fließgrenze										
ko6	zähflüssig	nicht ausrollbar und knetbar, da fließend	Kernverlust	0 0	0 sehr nass	sehr nass feu6	feu6 feu7	nur auf befestigten Baustraßen nicht bearbeitbar, unzulässig	nicht bearbeitbar, unzulässig extrem	extrem

¹⁾ Die Einheit Centibar wird hier in Anlehnung an das Schweizer Nomogramm verwendet.

Die Umrechnung in den pF-Wert erfolgt über eine Multiplikation mit 10 und einer anschließenden Logarithmierung zur Basis 10 (LOG10).

²⁾ Die Bearbeitbarkeit stark bindiger Böden (> 25 % Ton) ist bei sehr starker Austrocknung nur bedingt möglich, weil starke Klutenbildung die Bearbeitungsqualität – insbesondere im Hinblick auf die Wiederherstellung durchwurzelbarer Bodenschichten – vermindert.

Fortsetzung



Bildtafel 1: Felsabbruch im Neckartal (1988 und 2003)



Das Foto der Helikopterbefliegung zeigt den Felsabbruch vom Dezember 1988 im Bereich des Neckarprallhangs in den Weinbergen bei Poppenweiler.

Die gebankten Schichten des Oberen Muschelkalks (Trigonodusdolomit, oberer Hauptmuschelkalk) sind entlang von Klüften und Schichtfugen oberflächennah durch Hangentlastung stark zerklüftet, aufgelockert, z. T. überhängend und im Bereich von dünnen Mergelfugen oft kehlenartig unterhöhlten.

Durch Verwitterung, Entfestigung, Wurzel- und Frostspaltung werden die Blöcke vom Gesteinsverband gelöst und stürzen über die Weinberge bis zum darunterliegenden landwirtschaftlichen Fahrweg ab.

Die Folgen dieses Felsabgangs auf dem Feldweg. Die L 1100 wurde nur knapp verfehlt.
Nach weiteren kleineren Felsabgängen wurde der landwirtschaftliche Fahrweg im Jahr 2003 durch einen stabilen Schutzauf gesichert.





Im August 2003 kam es auf einem Privatgelände zu einem Absturz von ca. 1,2 m³ Fels. Teile davon haben den Sicherheitszaun erreicht. Das Bild links zeigt einen nur noch schwach verankerten Felsüberhang mit locker aufliegenden Steinplatten neben der Abbruchstelle.

Das Bild unten zeigt den neuen Sicherungszaun über dem landwirtschaftlichen Fahrweg und der L 1100.



Bildtafel 2: Steinschlagsicherung am Otto- Konz- Weg (2004)



Entlang dem Otto-Konz-Weg zum Freibad Hoheneck kommt es immer wieder zu Steinschlägen.

Hier sind die Gesteine des Oberen Muschelkalks am steilen Neckarprallhang oberflächennah stark geklüftet, aufgelockert und mit steinigem Hangschutt bedeckt. Die Durchwurzelung der Schuttdecke und der Gesteinsbänke trägt zusätzlich zur Auflockerung und zum Ausbrechen der Steine bei.

Regelmäßige Sicherungsmaßnahmen durch Baumfällung, Beräumung und Vermauerung werden durchgeführt.

Wegen vermehrt umstürzender Bäume auf den Fahrweg wurde der Hangwald 2015 saniert.

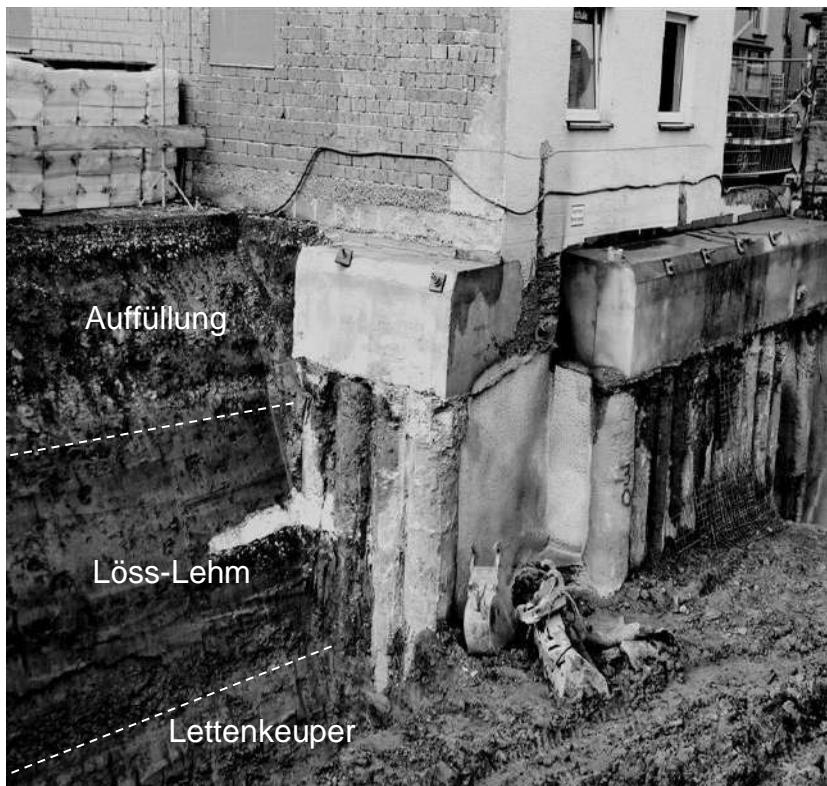
Bildtafel 3: Steinschlagsicherung in Poppenweiler, Sommerhalde 2008



Im Bereich des Fahrweges Sommerhalde kam es 2007 zu einem Steinschlag mit ca. 0,5 m³ Volumen. Der Felshang, ein ehemaliger Steinbruch im Oberen Muschelkalk, wurde mit verstärktem Maschendraht gesichert.

Bildtafel 4: Steinschlagsicherung am Osteingang des Grünparks Hungerberg (2009)

Am Osteingang zum Grünpark Hungerberg im ehemaligen Steinbruch Hubele musste der Fußweg durch eine massive Betonelementwand und durch Maschendrahtzaun gegen herabfallende Steine gesichert werden. Die stark geklüftete und aufgelockerte Felswand aus Karbonatgesteinen des Oberen Muschelkalks und an der Oberkante aus lockeren Schotterkonglomeraten des Pleistozäns (Eiszeitalter) wurde mit einem Bagger beräumt.

Bildtafel 5: Gebäudeunterfangung in der Alleenstraße (2004)

Bei diesem Bauvorhaben in der Alleenstraße wurde das Nachbargebäude durch eine überschnittene Bohrpfahlwand gesichert.

Links ist die mit über 70° steil geböschte, ungesicherte und nicht gegen Austrocknung abgedeckte Baugrubenwand mit einer Auflast sichtbar.

Bildtafel 6: Baugrube in der Hundshalde Eglosheim (1992)

An der Baugrubenwand sieht man ca. 20 - 40 cm Mutterboden über 0,5 - 2 m und Lösslehm und Löss. Darunter liegen verwitterte und angewitterte Gipskeuperschichten.

Bildtafel 7: Regenüberlaufbecken in Grünbühl (2004)

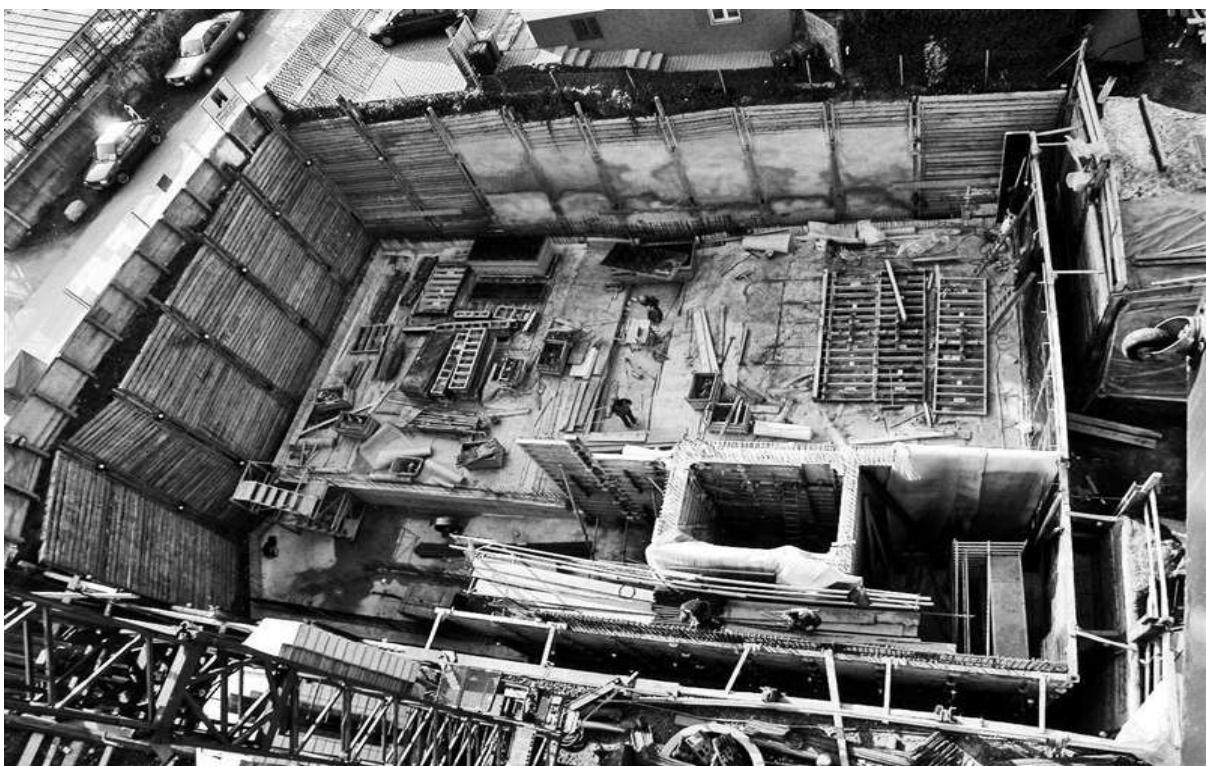
Beim Bau dieses Regenüberlaufbeckens wurde ein nach innen ausgesteifter Spundwandverbau mit Stahldielen verwendet.

Bildtafel 8: Schmutzfangbecken in der Pflugfelder Straße und Rosenstraße (2004)



Zwei Baugruben mit rückverankertem Trägerbohlenverbau (vertikale Stahlträger und Holzbohlen als Ausfachung). Oben links ist die Grubenwand geböscht und mit Folie gegen Austrocknung abgedeckt.

Hier wurde der Verbau neben dem Nachbargebäude zu dessen Sicherung mit einer verformungsarmen Betonausfachung ausgeführt.



Bildtafel 9: Faultürme und Gasbehälter der Kläranlage Hoheneck (2004)

Der geböschte Bereich der Baugrube mit Hangschutt und Oberem Muschelkalk wurde mittels Bodenvernagelung und Spritzbeton auf Stahlmatte gesichert.

Darunter wurde die senkrechte Wand durch rückverankerte Bohrpfähle im Oberen Muschelkalk im Abstand von ca. 1 - 2 m mit einer Spritzbetonausfachung gesichert.





Die vor dem Aushub gebohrten und betonierten Pfähle werden im Zuge der schrittweisen Baugrubenvertiefung in 2 Reihen mit vorgespannten Ankern gesichert.

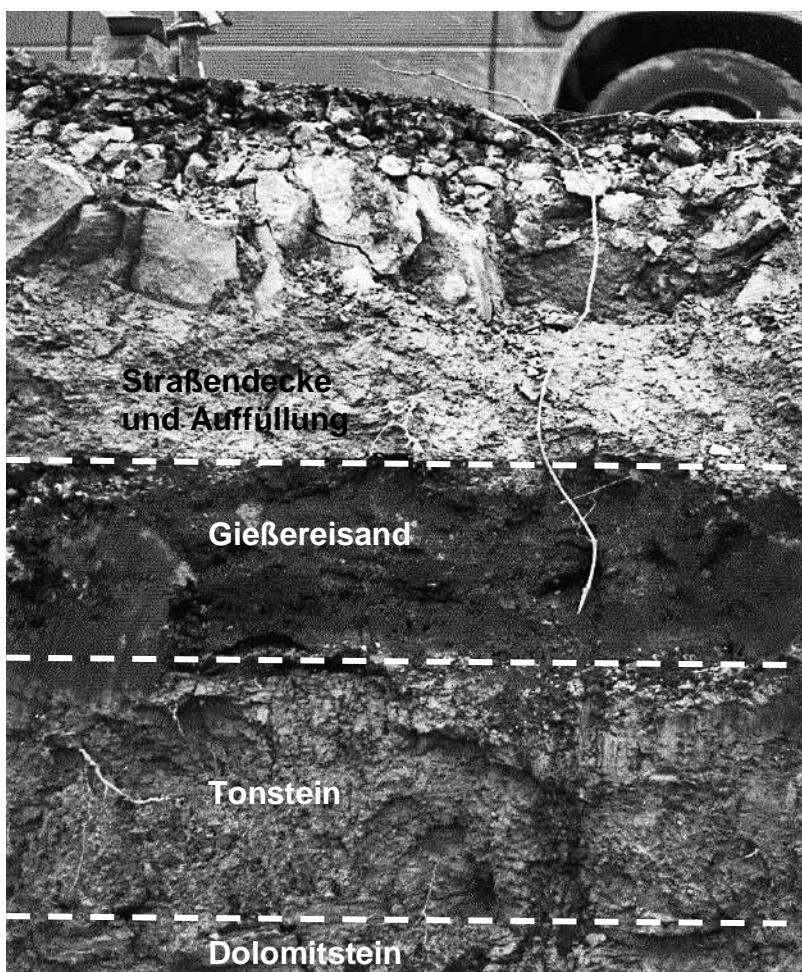
Zwischen den Bohrpfählen wird die Baugrubenwand mit bewehrtem Spritzbeton gesichert. Dabei kam es zu einem Ausbruch und Ausfluss des Bodenmaterials im Bereich des Grundwasserspiegels.





Die Baugruben der 2 Faultürme und die Bodenplatte des Gasbehälters im Überblick:
Oben rechts neben dem Gasbehälter wird der Hang durch Blocksteine gesichert.
Der Baustellenkran sitzt auf Bohrpfählen der Pfahlwand für die Baugrube der Gasbehälter.
Diese ungewöhnliche Anordnung wurde statisch berechnet und als standsicher bewertet.

Bildtafel 10: Baugrube ehemalige Gießerei Barth, Martin-Luther-Straße (1988)



In der steil geböschten Baugrube (Sicherung?) liegen unter der Auffüllung verwitterte Tonmergelsteine und eine angewitterte Dolomitsteinbank des Lettenkeupers.

Links ist unter der Straßendecke und Auffüllung eine schwarze Schicht aus Gießereisand zu sehen. Darunter liegen verwitterte Tonmergelsteine und einer Dolomitsteinbank.

Bildtafel 11: Erdfall in Poppenweiler (2001)

Ein kleiner Erdfall (Einsturzdoline) auf einem Privatgrundstück in der Alten Steige in Poppenweiler.

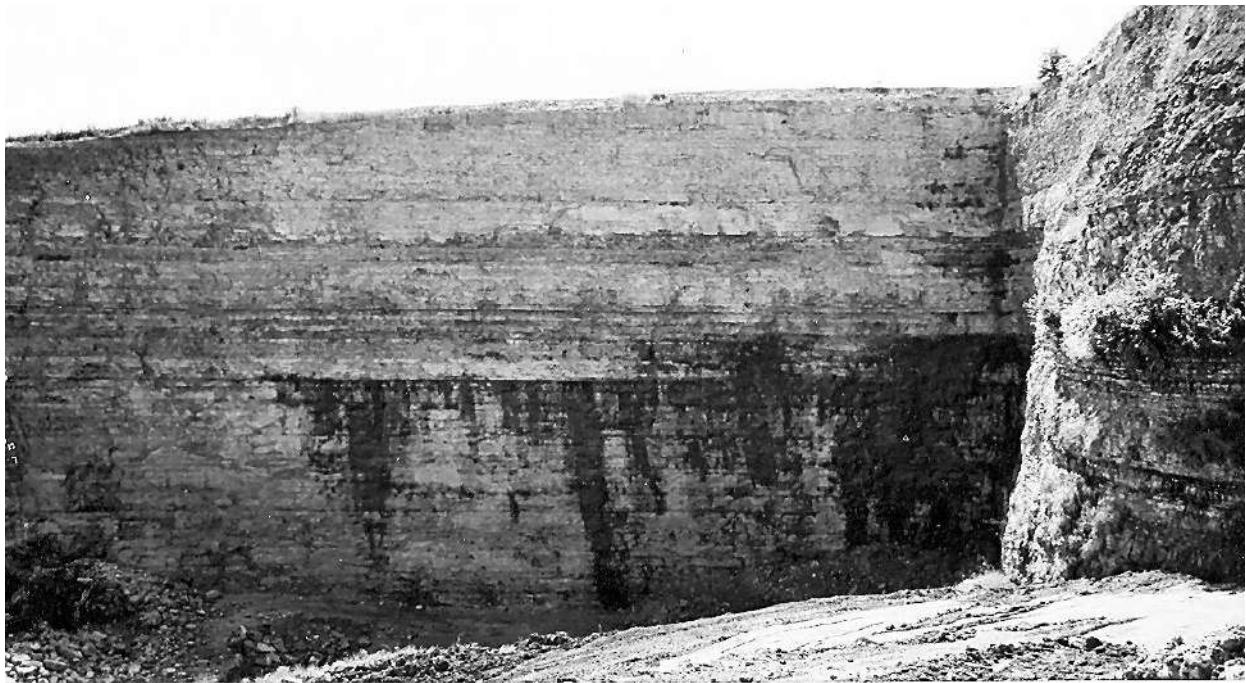
Die Sulfatgesteine (Gips und Anhydrit) des Mittleren Muschelkalks werden in ca. 50 m Tiefe vom Grundwasser gelöst und schaffen einen kaminartigen Hohlraum, der mit der Zeit bis zur Oberfläche, hier Oberer Muschelkalk und Hangschutt durchbricht.

Der Erdfall wurde mit beton gebundenen Schroppen verschlossen.



Bildtafel 12: Erdfall im Favoritepark (2004)

Dieser Erdfall im Favoritepark reicht vom Lettenkeuper vermutlich bis in die Gesteinsschichten des Oberen- und Mittleren Muschelkalks und ist schon vor längerer Zeit eingebrochen. Er zeigt keine sichtbare Verbindung in die Tiefe. Das Wasser des kleinen und nur temporär fließenden Baches versickert jedoch im Schutt der Auffüllung und im stark klüftigen Gestein und trägt mit zur Auslaugung des Untergrundes im Oberen Muschelkalk bei. Im Bereich der Lettenkeuper-Muschelkalk-Gäuflächen gibt es zahlreiche Erdfälle und erdfallartige Karststrukturen.

Bildtafel 13: Ehemaliger Steinbruch Hubele (1988)

Die Westwand des heute verfüllten Steinbruchs Hubele in Hoheneck (Grünanlage Hungerberg). Die Oberfläche besteht aus einer weniger als 2 m mächtigen Deckschicht aus Lösslehm und Löss über Oberem Muschelkalk der Meißner- und z.T. der Rottweil-Formation. Stellenweise waren bzw. sind Reste verfestigter Flussschotter aus früheren Kaltzeiten als Beleg für ältere und höher gelegene Neckarflussläufe aufgeschlossen. Die geklüfteten Kalksteinbänke sind durch dünne Tonsteinfugen getrennt. In der Mitte erkennt man den Wasseraustritt eines sogenannten "schwebenden Grundwasserhorizonts", der von einer Tonsteinschicht aufgestaut wird.

Bildtafel 14: Altlastensanierung auf dem MLF-Gelände (2009 - 2010)



Der mit Lösemittel (LHKW - Per) stark verunreinigte Boden und das verunreinigte Grundwasser im Bereich der ehemaligen Metall- und Lackierwarenfabrik (MLF) in der Alt-Württemberg-Allee wurden zunächst durch eine jahrelange Bodenluft- und Grundwasserabsaugung saniert. Dabei wurden über 3 Tonnen an leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen entsorgt. Die Restbelastung im bindigen Boden wurde durch einen bis zu 12 m tiefen Aushub und Bodenaustausch saniert. Zusammen mit einer aufwendigen Abdichtung der Kellergeschosse gegen die kontaminierte Bodenluft können so sichere Wohnverhältnisse dauerhaft gewährleistet werden. Heute steht hier eine Wohnanlage mit Kindergarten. Schadstoffreste im Grundwasser des Lettenkeupers werden noch einige Zeit über Aktivkohle saniert. Die Fotos zeigen die Wiederverfüllung der Grube mit Bermen, Bohlenträgerverbau und einer Bohrpfahlwand zur Sicherung der Baugrube.



Bildtafel 15: Abbruch- und Bodensanierung auf dem Gelände der ehemaligen Flakkaserne - Hartenecker Höhe (2010 - 2012)



Auf der ca. 17 ha große Fläche der ehemaligen Flakkaserne in Ludwigsburg-Ößweil wurden alle Wohn- und Arbeitsgebäude abgerissen. Die Baumaterialien wurden nach dem Grad der Verunreinigung sortiert, wiederverwertet oder entsorgt.

Im Boden befanden sich an vielen Stellen im Bereich von ehemaligen Tankstellen, Montagegruben, Wasch- und Abstellflächen tiefreichenden Verunreinigungen, v.a. mit Treibstoffen, Schmierstoffen und Lösemitteln. Diese Verunreinigungen wurden ausgehoben und der Boden wurde wiederverwertet oder entsorgt. Die Gruben wurden mit schadstofffreiem Boden aufgefüllt und verdichtet.

Nach Abschluss der Bodensanierung wurde auf dem Gelände die neue Wohnsiedlung "Hartenecker Höhe" errichtet.





7. Literatur

- ACHMUS, M. (2012) Schäden bei Baugrubensicherungen. -- Schadensfreies Bauen 44. Hrsg.: Ralf Ruhnau, Fraunhofer IRB-Verlag Stuttgart.
- ALDINGER, V., KNOBLICH, R. & Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (1968): Der Baugrund von Stuttgart. -- Kartenwerk 1 : 5 000 und 1 : 10 000 und Erläuterungen. Hrsg. v. Stadtmessungsamt Stuttgart.
- BADEN- WÜRTTEMBERGISCHER LANDTAG (2004): Gesetz zur Ausführung des Bundes- Bodenschutzgesetzes (Landesbodenschutz- und Altlastengesetz – LBodSchAG) und zur Änderung abfallrechtlicher und wasserrechtlicher Vorschriften. -- Gesetzblatt für Baden- Württemberg Nr. 17 vom 28.12.2004, Stuttgart.
- BEHTEL, H. (1998): Kernkraftwerk Neckarwestheim auf Fels gebaut? Setzungen, Sackungen, Senkungen nur unter den Kühltürmen? -- Manuskript zum öffentlichen Vortrag am 24.11.1998 in Besigheim.
- BOLT, B. A. (1995): Erdbeben: Schlüssel zur Geodynamik. -- Spectrum, Heidelberg.
- BORCHERT & Große (2010): Vereinheitlichung der Boden- und Felsklassen in den Normen der VOB, Teil C. In: VOB aktuell, Ausgabe 3/10, Beuth, Berlin.
- BRUNNER, H. (1994): Erläuterungen zu Blatt 7021 Marbach am Neckar. -- Geol. Karte 1 : 25 000 von Baden- Württemberg, Freiburg i. Br./Stuttgart.
- (1998): Erläuterungen zum Blatt Stuttgart und Umgebung. 6., völlig neub. Aufl. -- Geol. Karte 1 : 50 000 von Baden- Württemberg, Stuttgart.
- BUND DER INGENIEURE FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABFALLWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. - BWK (Hrsg.) (2003): Nutzungskonflikte bei hohen Grundwasserständen - Lösungsansätze. -- Statusbericht 1/2003, Sindelfingen.
- (2009): Ermittlung des Bemessungsgrundwasserstandes für Bauwerksabdichtungen. -- Merkblatt BWK-M8, Sindelfingen.
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA) (Hrsg.) (2003): Mitteilung 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln.
- DACHROTH, W. (2017): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. -- Springer, Wiesbaden.
- DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie“ (2017-12), Beuth Verlag, Berlin, Erläuterungen zur WU-Richtlinie.
- Erläuterungen zur WU-Richtlinie DAfStb-Heft 555, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin 2006[5] DBV-Merkblatt „Hochwertige Nutzung von Untergeschossen“, Fassung Januar 2009, Deutscher Beton- und Bau- technik Verein E.V., Berlin.
- DBV-Merkblatt „Hochwertige Nutzung von Untergeschossen“, Fassung Januar 2009, Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E.V., Berlin.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (Hrsg.) (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG). -- Bundesgesetzblatt, Jahrg. 1998 Teil I, Nr. 16 vom 24.03.1998, Bonn.
- (1999): Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). -- Bundesgesetzblatt, Jahrg. 1999 Teil I, Nr. 36 vom 16.07.1999, Bonn.
- DÜRR, R. (1982): Strukturgeologische Untersuchungen im Bereich der Neckar- Jagst- Furche (Baden-Württemberg). -- Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart, N.F. 77, Stuttgart.
- DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON E. V. (2017): DAfStb-Richtlinie »Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton« (WU-Richtlinie), 12/2017
- DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (2018): Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie »Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton«, Heft 555, Beuth Verlag, 2006. Hinweis: Überarbeitete Neuausgabe 2018.
- DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES E.V. - DVGW (Hrsg.) (1995): Technische Regeln, Arbeitsblatt W 101, Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; Teil 1: Schutzgebiete für Grundwasser. -- Bonn.
- EBERLE, J. et al. (2023): Deutschlands Süden vom Erdmittelalter zur Gegenwart. – 4. Auflage. Spektrum, Springer, Berlin.

- EINSELE, G. et al. (1985): Auflockerung und Verwitterung in der Ingenieurgeologie. -- Springer, Berlin
- ELSER, A. (2004): Der Umgang mit dem Baustoff Boden. Es gibt keine schlechten Böden sondern nur falsche Bauweisen! -- Tischvorlage zum Vortrag am 01.12.2004 bei der Firma Heinz Schnorpfeil, Bau GmbH in Treis-Karden
- FLOSS, R. (1997): Zusätzlichen technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. -- ZTVE-StB 94, Fassung 1997, Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau. Kirschbaum, Bonn.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR DAS STRAßENWESEN UND VERKEHRSWESEN E.V. (Hrsg.) (1980): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten – RiStWaG. -- Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRÄßen- UND VERKEHRSWESEN E.V. – FGSV (Hrsg.) (1980): Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau: Merkblatt über Felsgruppenbeschreibung für Bautechnische Zwecke im Straßenbau. -- Berlin.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRÄßen- UND VERKEHRSWESEN E.V. – FGSV (Hrsg.) (1992): Merkblatt über Felsgruppenbeschreibung für bautechnische Zwecke im Straßenbau. -- Berlin.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRÄßen- UND VERKEHRSWESEN E.V. – FGSV (Hrsg.) (1985): Merkblatt Erweiterte Klassifikation der Verwitterungsgrade. -- Köln.
- FRANK, M. (1950): Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte von Württemberg, Blatt Stuttgart- Nordost Nr. 7121. -- Geol. Karte 1 : 25 000 von Baden-Württemberg, Stuttgart.
- FRAUNHOFER IRB-Verlag (Hrsg.) (2011): Schäden an Gründungen und erdberührten Bauteilen. Ursachen – Bewertung – Sanierung. – 46. Bausachverständigen-Tag im Rahmen der Frankfurter Bautage 2011.
- FREISING, H. & WURM, F. (1982): Erläuterung zu Blatt 7020 Bietigheim- Bissingen. -- Geol. Karte 1 : 25 000 von Baden-Württemberg, Stuttgart.
- GEYER, O. F. & GWINNER, M. P. (1991): Geologie von Baden- Würtemberg, 4. Aufl. -- Schweizerbart, Stuttgart.
- (2022): Geologie von Baden- Würtemberg, 6. Aufl. -- Hrsg. von GEYER, M., NITSCH, E., SIMON, T. – Schweizerbart, Stuttgart.
- GROHMANN, A., HÄSSELBARTH, U. & SCHWERDTFEGER, W. (2003): Die Trinkwasserverordnung. Einführung und Erläuterungen für Wasserversorgungsunternehmen und Überwachungsbehörden. 4. Aufl. -- E. Schmidt, Berlin.
- GRÜNTHAL, G. et al. (2018): The probabilistic seismic hazard assessment of Germany—version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. -- Bull Earthquake eng.
- GWINNER, M. P. & HINKELBEIN, K. (1976): Stuttgart und Umgebung. Sammlung geol. Führer, 61. -- Bornträger, Berlin und Stuttgart.
- HANDBUCH EC7-1+2 (2011): Handbuch Eurocode 7 - Geotechnische Bemessung. Band 1 + 2, Allgemeine Regeln. -- 1. Auflage, Beuth, Berlin.
- HEINRICH, W. et al. (2016): Baugrund und Fundament. Ein Ratgeber von RWE Power, Köln.
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie. Einer Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 5. Aufl. -- Enke, Stuttgart.
- INNENMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (1972): Erdbebensicher Bauen, Planungshilfe für Bauherren, Architekten und Ingenieure. -- 2. aktualisierte Auflage 1988. Stuttgart.
- INNENMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG & LANDESVERMESSUNGSAKT BADEN- WÜRTTEMBERG (2005): Karte der Erdbebenzonen und geologischer Untergrundklassen für Baden- Würtemberg, 1 : 350000. -- Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- INSTUTUT FÜR LÄNDERKUNDE, LEIPZIG (Hrsg.) (2003): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Relief, Boden und Wasser. -- Mitherausgegeben von LIEDKE, H., MÄUSBACHER, R. und SCHMIDT, K. H.. Spektrum, Heidelberg.
- KATZENBACH, R. (2013): Studienunterlagen Geotechnik. -- Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt.
- KEMPFERT, H.G., RAITHEL, M. (2014): Geotechnik nach Eurocode, Band 1, Bodenmechanik und Band 2 Grundbau. -- 4. Auflage, Beuth, Berlin,

- KRANZ, W. (1964): Erläuterungen zu Blatt 7120 Stuttgart- Nordwest. -- Geol. Karte 1 : 25 000 von Baden- Württemberg. 1. Aufl. von 1942, Stuttgart.
- KRAUSE, H. & WENNINGER, A. (1990): Baugrund und Grundwasser in Ludwigsburg. Kartenwerk im Maßstab 1 : 10 000 mit Erläuterungen. -- Hrsg.: Bauverwaltungs- und Bauordnungsamt der Stadtverwaltung Ludwigsburg.
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU, REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG (Hrsg.), Wagenplast, P., (2005): Ingenieurgeologische Gefahren in Baden-Württemberg. Information 16. -- Freiburg.
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU & MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN- WÜRTTEMBERG (Hrsg.), (2005): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. 4. überarb. Auflage. -- Stuttgart.
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU UND LANDESHAUPTSTADT STUTTGART (Hrsg.), ROGOWSKI, E. (2012): Der Baugrund von Stuttgart. -- Stuttgart.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ & ROTH, L. (Hrsg.), (1992 ff): Grenzwerte. Kennzahlen zur Umweltbelastung in Deutschland und der EG. Tabellenwerk. -- Ecomed, Landsberg.
- LANDESHAUPTSTADT STUTTGART (Hrsg.), (1996): Hydrogeologie und Baugrund, Schutz der Mineral- und Heilquellen - eine Bestandsaufnahme und Bewertung in Zusammenhang mit der Planung für das Städtebauprojekt "Stuttgart 21". -- Untersuchungen zur Umwelt, "Stuttgart 21", Heft 3/1996, Stuttgart.
- (Hrsg.) (2003). Kommunaler Umweltbericht: Das Grundwasser in Stuttgart. -- Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft 1/2003, Stuttgart.
- LANDKREIS LUDWIGSBURG (Hrsg.), (1993): Merkblatt zur Herstellung von Baugrundaufschlüssen und Grundwassermessstellen bei Baugrunderkundungen und Grundwasserschadensfällen (Merkblatt Grundwasseraufschlüsse). -- Hrsg. vom Amt für Wasser- und Bodenschutz (vormals Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz, Besigheim), Ludwigsburg.
- LANDKREIS LUDWIGSBURG (Hrsg.), (2002): Atlas Altlasten und altlastverdächtige Flächen, Stadt Ludwigsburg. -- Landratsamt Ludwigsburg, Amt für Wasser- und Bodenschutz, Ludwigsburg.
- LANDKREIS LUDWIGSBURG (Hrsg.), (2011): Fortschreibung der Erfassung altlastverdächtiger Flächen im Landkreis Ludwigsburg. Stadt Ludwigsburg. -- Landratsamt Ludwigsburg, Fachbereich Umwelt, Ludwigsburg.
- MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG, UNIVERSITÄT HOHENHEIM (LH) & UNIVERSITÄT FREIBURG (1977): Freiräume in Stadtlandschaften. -- Stuttgart.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR UND SOZIALMINISTERIUM DES LANDES BADEN- WÜRTTEMBERG (Hrsg.), (1998): Gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Umwelt u. Verkehr und des Sozialministeriums über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen. – Gemeinsames Amtsblatt des Landes Baden- Württemberg, 46. Jahrgang, Nr. 8, vom 06.05.1998, hrsg. vom Staatsanzeiger Bad.- Württ., Stuttgart.
- MOORMANN, C. (2007): Bohrpfähle in Fels und veränderlich festen Gesteinen. Vortrag im Rahmen der Fachtagung "Die neue EA- Pfähle" 22. November 2007. -- Vereinigung der Prüfingenieure für Bautechnik e.V., Landesvereinigung Hamburg.
- NICKMANN, M. (2009): Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter Ingenieurgeologischen Aspekten. -- Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen Reihe B: Ingenieurgeologie, Hydrogeologie, Geothermie, Band 12, München.
- PARET, O. (1934): Ludwigsburg und das Land um den Asperg. -- Aigner, Ludwigsburg.
- PRINZ, H., STRAUß, R. (2006): Abriss der Ingenieurgeologie. 4. Aufl. -- Spektrum Akademischer Verlag, Elsevier, München.
- PRINZ, H., STRAUß, R. (2011): Ingenieurgeologie. 5. Aufl. -- Spektrum Akademischer Verlag, Elsevier, München.
- PRINZ, H., STRAUß, R. (2018): Ingenieurgeologie. 6. Aufl. – Springer Spektrum.
- ROGOWSKI, E. (2012): Der Baugrund von Stuttgart. -- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Landeshauptstadt Stuttgart.

- ROSENKRANZ, D., BACHMANN, G., KÖNIG, W. & EINSELE, G., (Hrsg.), (1988 ff): Bodenschutz. Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. -- E. Schmidt, Berlin.
- SCHICK, R. (1997): Erdbeben und Vulkane. -- Beck, München.
- SCHMIDT, H.- H. et al. (2017): Grundlagen der Geotechnik. -- Springer, Wiesbaden.
- SCHNEIDER, G. (2004): Erdbeben. Eine Einführung für Geowissenschaftler und Ingenieure. -- Spektrum Akademischer Verlag, Elsevier, München.
- SCHREINER, A. (1987): Einführung in die Quartärgeologie. 2. Aufl. -- Schweizerbart, Stuttgart.
- SCHULTHEIß, S. & GOOS, W. (1993): Altlasten. Eine Einführung für Naturwissenschaftler, Ingenieure und Planer. -- Claustaler Tekton. Hefte, 28, Sven von Loga, Köln.
- SEYFRIED, H. et al. (2021): Die Landschaften von Baden-Württemberg, 2. Aufl., Schmidt, Neustadt an der Aisch.
- STADT LUDWIGSBURG (Hrsg.), (1995): Fliegerschäden in Ludwigsburg im 2. Weltkrieg. Luftangriffe mit Bombenabwürfen und -schäden nach verschiedenen Quellen. Schadenskarten des Stadtmessungsamts 1943 - 1945 (Quelle 15e). -- Unveröffentl. Manuskriptkarte, Stadtmessungamt der Stadtverwaltung Ludwigsburg.
- STADT LUDWIGSBURG (Hrsg.), GOOS, W. (1996): Verschmutzungsempfindlichkeit des Untergrunds in Ludwigsburg. Karte und Erläuterung. -- Unveröffentl. Manuskript, Tiefbau- und Grünflächenamt der Stadtverwaltung Ludwigsburg.
- (1997 bis 2018): Schadstoffe in der Umwelt. Eine Zusammenfassung von Daten und Fakten. -- Unveröffentl. Manuskript, Fachbereich Tiefbau und Grünflächen der Stadtverwaltung Ludwigsburg.
- (2005 bis 2018): Klimageschichte und Erderwärmung. -- Unveröffentl. Manuskript, Fachbereich Tiefbau und Grünflächen der Stadtverwaltung Ludwigsburg.
- (2005 bis 2026): Geologie in Ludwigsburg. -- Fachbereich Tiefbau und Grünflächen der Stadtverwaltung Ludwigsburg.
- STADT LUDWIGSBURG (Hrsg.), KADELBACH, S. (2000): Bodenbelastung Markung Stadt Ludwigsburg. -- Unveröffentl. Manuskript, Tiefbau- und Grünflächenamt der Stadtverwaltung Ludwigsburg.
- STIER, C., BEHMEL, H. & SCHOLLENBERGER, U. (1989): Wüsten, Meere und Vulkane. Baden- Württemberg in Bildern aus der Erdgeschichte. -- Grohmann, Stuttgart.
- TÜRKE, H. (1990/93): Statik im Erdbau. -- Nachdruck der 2. überarb. Auflage. Ernst & Sohn, Berlin.
- UFRECHT, W. & EINSELE, G. (Hrsg.), (1998): Das Stuttgarter Mineralwasser - Herkunft und Genese. Ergebnisse der Vortragsveranstaltung am 24. Oktober 1997 in Stuttgart. -- Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft 1/1998, Stuttgart.
- UMEG, GESELLSCHAFT FÜR UMWELTMESSUNGEN UND UMWELTERHEBUNG GmbH (1999): Bodenzustandsbericht Großraum Stuttgart. Schadstoffgehalte der Böden. -- Hrsg. vom Ministerium für Umwelt und Verkehr, Baden-Württemberg im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Karlsruhe, Stuttgart.
- UMWELTMINISTERIUM BADEN- WÜRTTEMBERG (Hrsg.), (1993): 3. Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums zum Bodenschutzgesetz über die Ermittlung und Einstufung von Gehalten anorganischer Schadstoffe im Boden (VwV Anorganische Schadstoffe). -- Gemeinsames Amtsblatt des Landes Baden-Württemberg, 41. Jahrgang, Nr. 30, vom 29.09.1993, hrsg. vom Staatsanzeiger Baden-Württ., Stuttgart.
- (1995): 4. Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums zum Bodenschutzgesetz über die Ermittlung und Einstufung von Gehalten organischer Schadstoffe im Boden (VwV Organische Schadstoffe). -- Gemeinsames Amtsblatt des Landes Baden- Württemberg, 43. Jahrgang, Nr. 2, vom 14.02.1996, hrsg. vom Staatsanzeiger Bad.-Württ., Stuttgart.
- VILLINGER, E. (1998): Zur Flussgeschichte von Rhein und Donau in Südwestdeutschland. -- Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., NF., 80.
- VOLLRATH, A., STRÖBEL, W., MÜLLER, S. & CARLE, W. (1959): Karte und Erläuterung zur Geologischen Karte von Stuttgart und Umgebung 1 : 50 000. -- Hrsg. v. Geol. Landesamt Baden-Württ., Stuttgart.

- WAGNER, G. & Koch, A. (1961): Raumbilder zur Erd- und Landschaftsgeschichte Südwestdeutschlands. Das Bild in Forschung und Lehre. Veröffentlichung der Landesbildstellen Baden-Württemberg, Band III. -- Repro-Druck, Schmieden.
- WALLRAUCH, E. (1969): Verwitterung und Entspannung bei überkonsolidierten tonig-schluffigen Gesteinen Südwestdeutschlands. -- Dissertation an der Univ. Tübingen.
- WILD, D. (1977): Erd- und Landschaftsgeschichte des Kreises - aus: Der Kreis Ludwigsburg. -- Theiss, Stuttgart.
- ZILLENBILLER, E. (1996): Kulturlandschaft - Erbe und Auftrag: Entwicklungsphasen von der Natur- zur Kulturlandschaft. -- Regionalkultur, Ubstadt- Weiher.

8. Baugrundgeologische Karte von Ludwigsburg, Mächtigkeiten der quartären Deckschichten

Bearbeitung:

Dr. Heinz Krause, Blätter 60-4 und 60-5 (LGRB-Freiburg)

Dr. Albrecht Wenninger, Blatt 61-5 (Stadt Ludwigsburg)

Dipl. Geol. Rainer Kiefer, Blatt 61-4

Dr. Wolfgang Goos, Hydrogeologie, Altlasten (Stadt Ludwigsburg)

Dipl. Geol. Dieterich Kraus, Hydrogeologie

Kartographie und Kartengrundlage:

Stadtmessungsamt Ludwigsburg

Dipl. Ing. Gernot Brück

Stand 1989

Maßstab ca. 1 : 10 000

Die dargestellten Mächtigkeiten der quartären Deckschichten und die Lage der Grundsichten wurden aus vielen Einzelbohrungen, Rammkernsondierungen, Schürfen und Geländeaufschlüssen durch Interpolation bestimmt. Eine Gewähr für die Richtigkeit der Angaben und Daten wird nicht übernommen.

Die nördlichen und östlichen Teile der Markung wurden noch nicht untersucht.

Legende zur Beilage 1 Baugrundgeologische Karte

Deckschichten

<2 unter 2 m

2 - 5 2 bis 5 m

5 - 8 5 bis 8 m

>8 über 8 m

Bach-, untergeordnet Seeablagerungen mit organ. Resten (Schlick, selten Torf)

Auffüllungen und Damm schüttungen, Mächtigkeit > 2 m

Mächtigkeit der Deckschichten in m bei:

•^{2,4} Bohrung

■^{5,3} Schurf oder Baugrube

×^{3,6} Sondierung

Grundsichten

km1 Gipskeuper

ku Lettenkeuper

mo Oberer Muschelkalk,

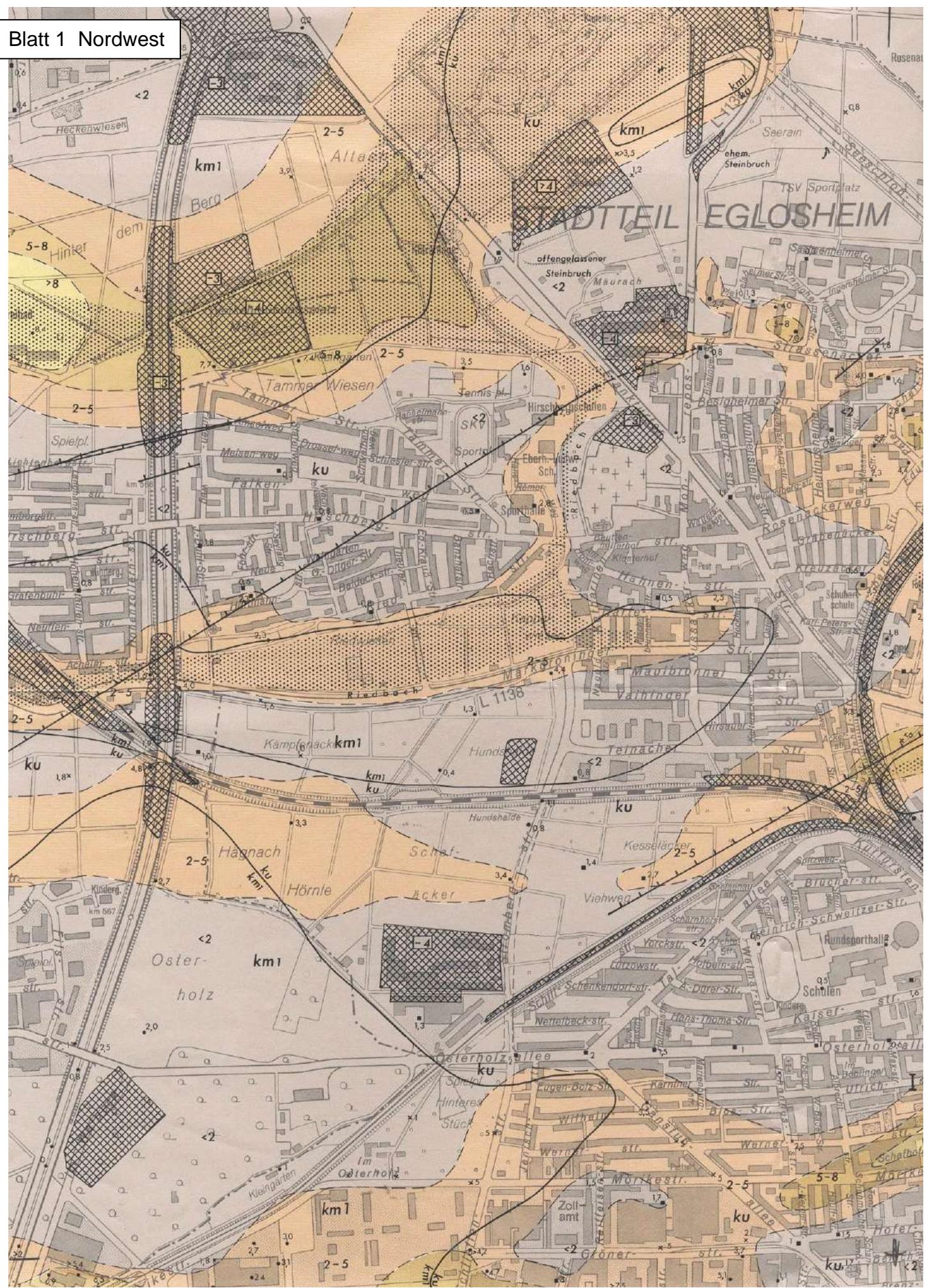
Grenze Gipskeuper - Lettenkeuper

Grenze Lettenkeuper - Oberer Muschelkalk

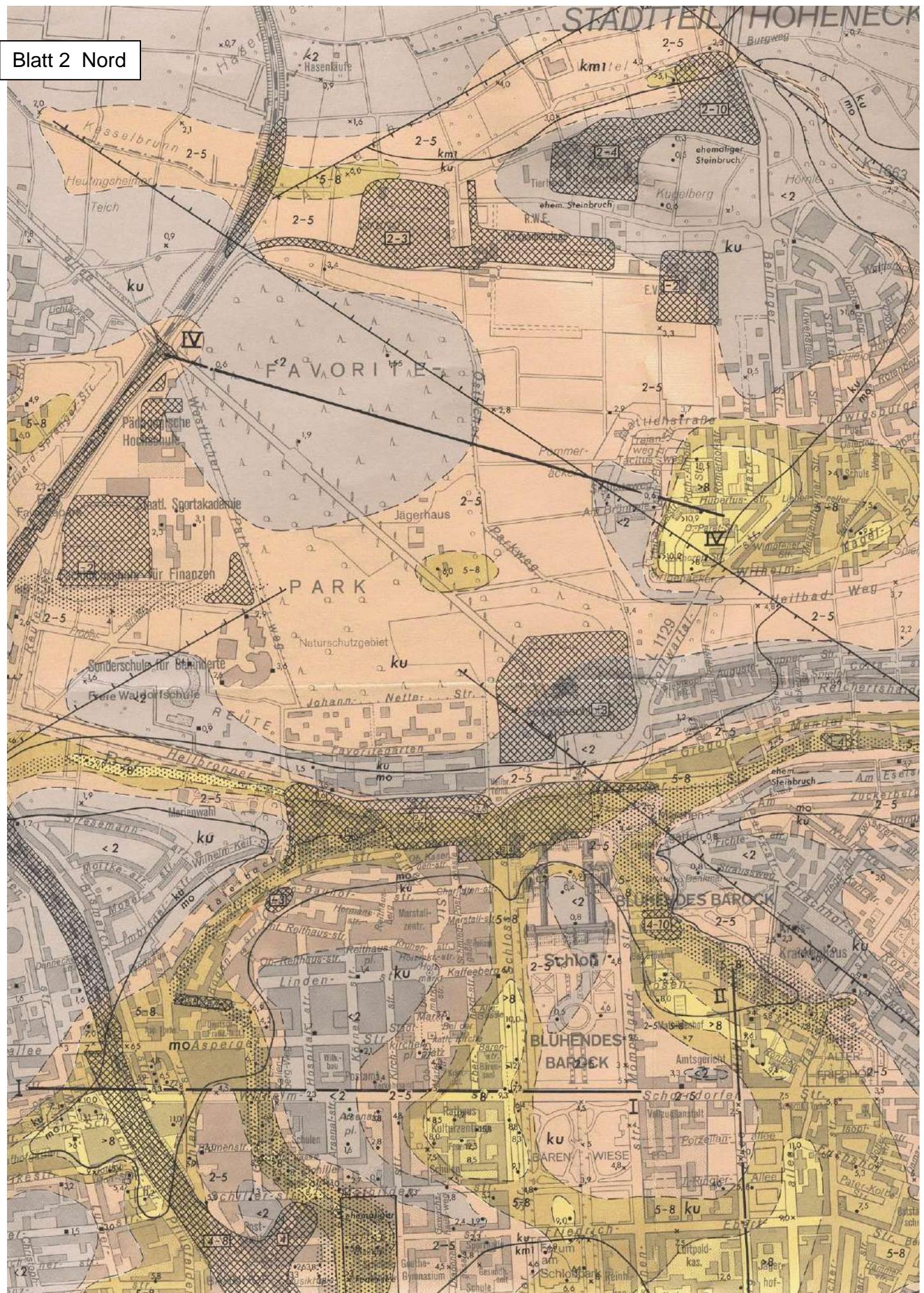
Verwerfung / Lineation

I — **II** Geologischer Schnitt

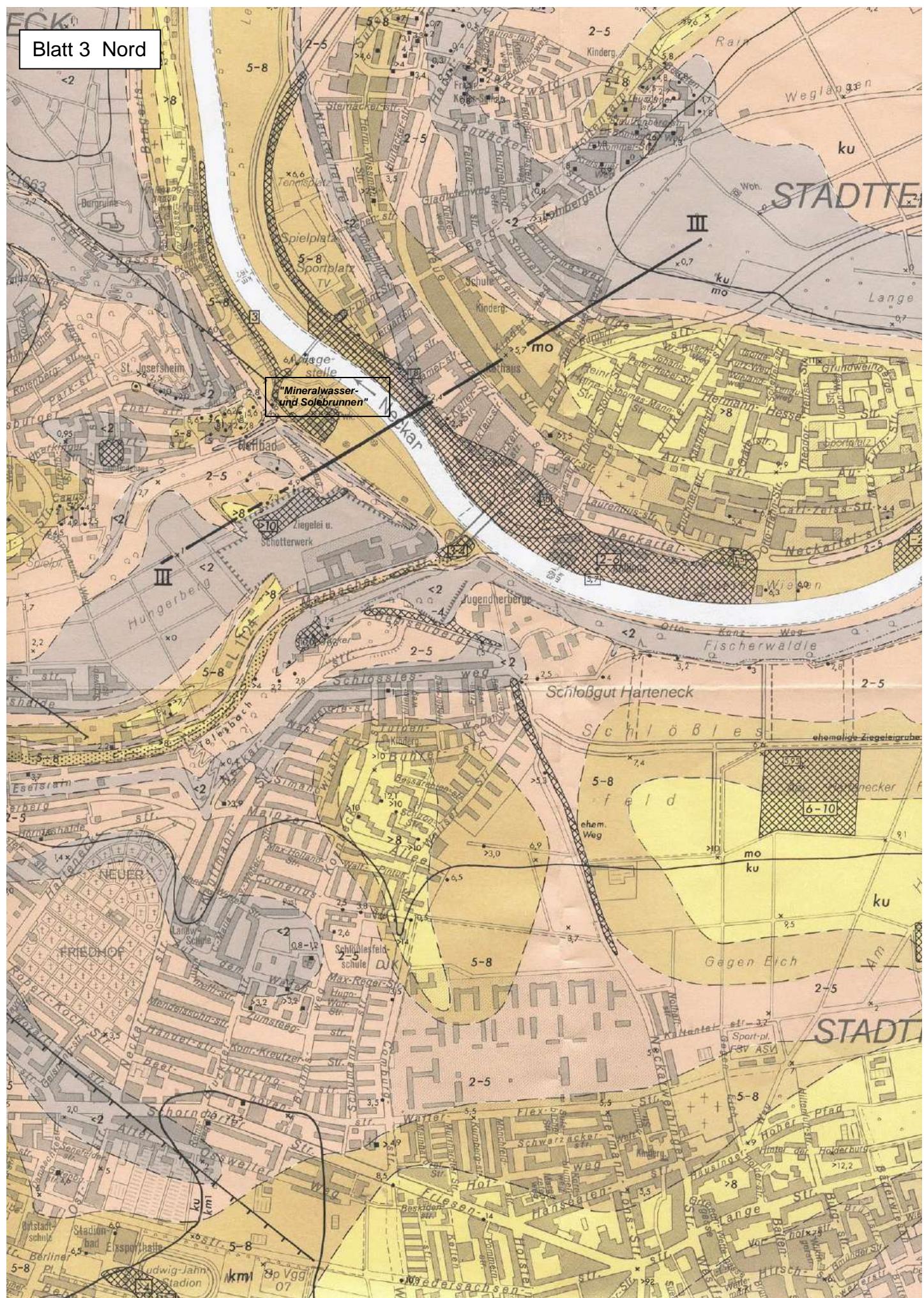
Blatt 1 Nordwest



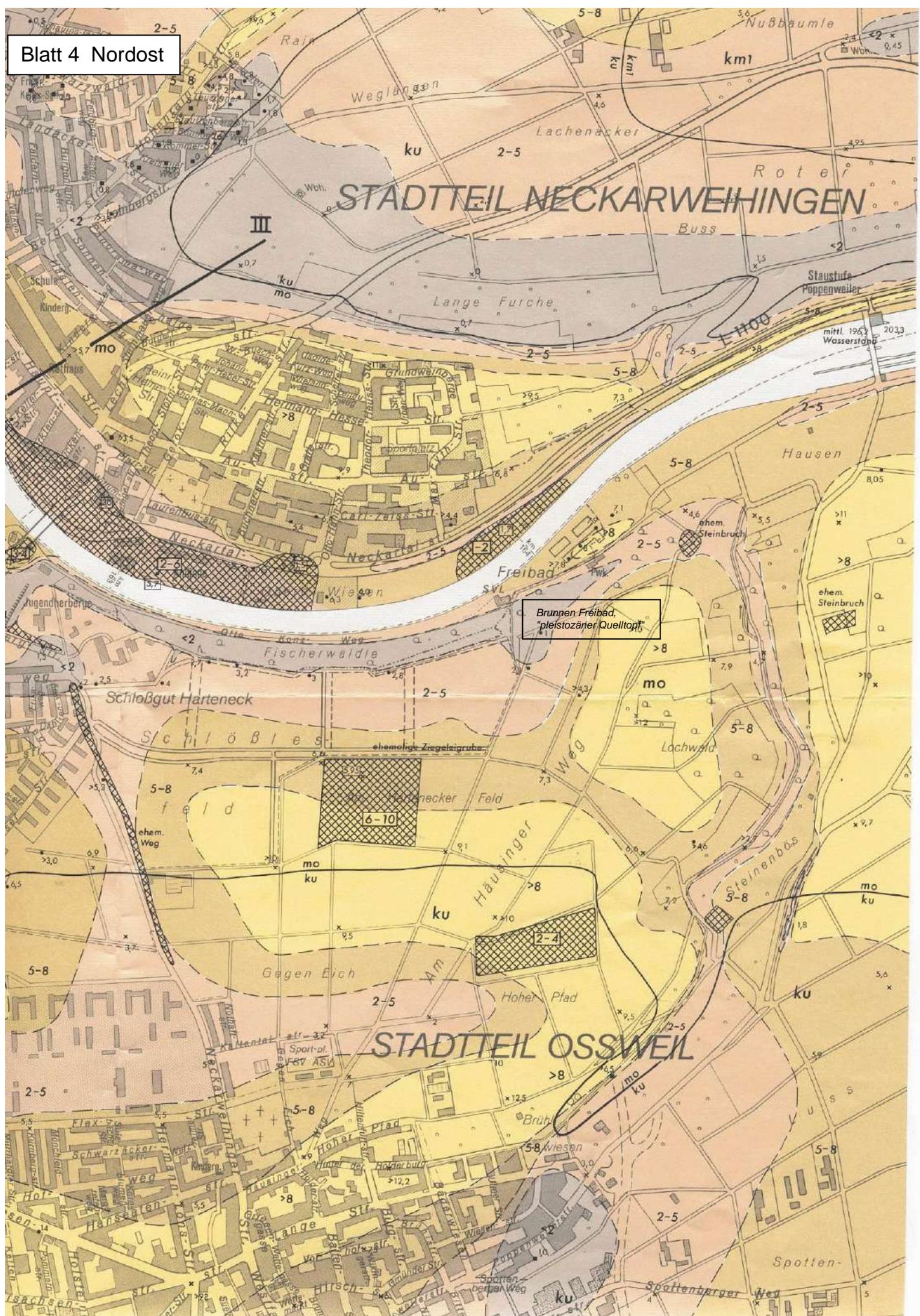
Blatt 2 Nord



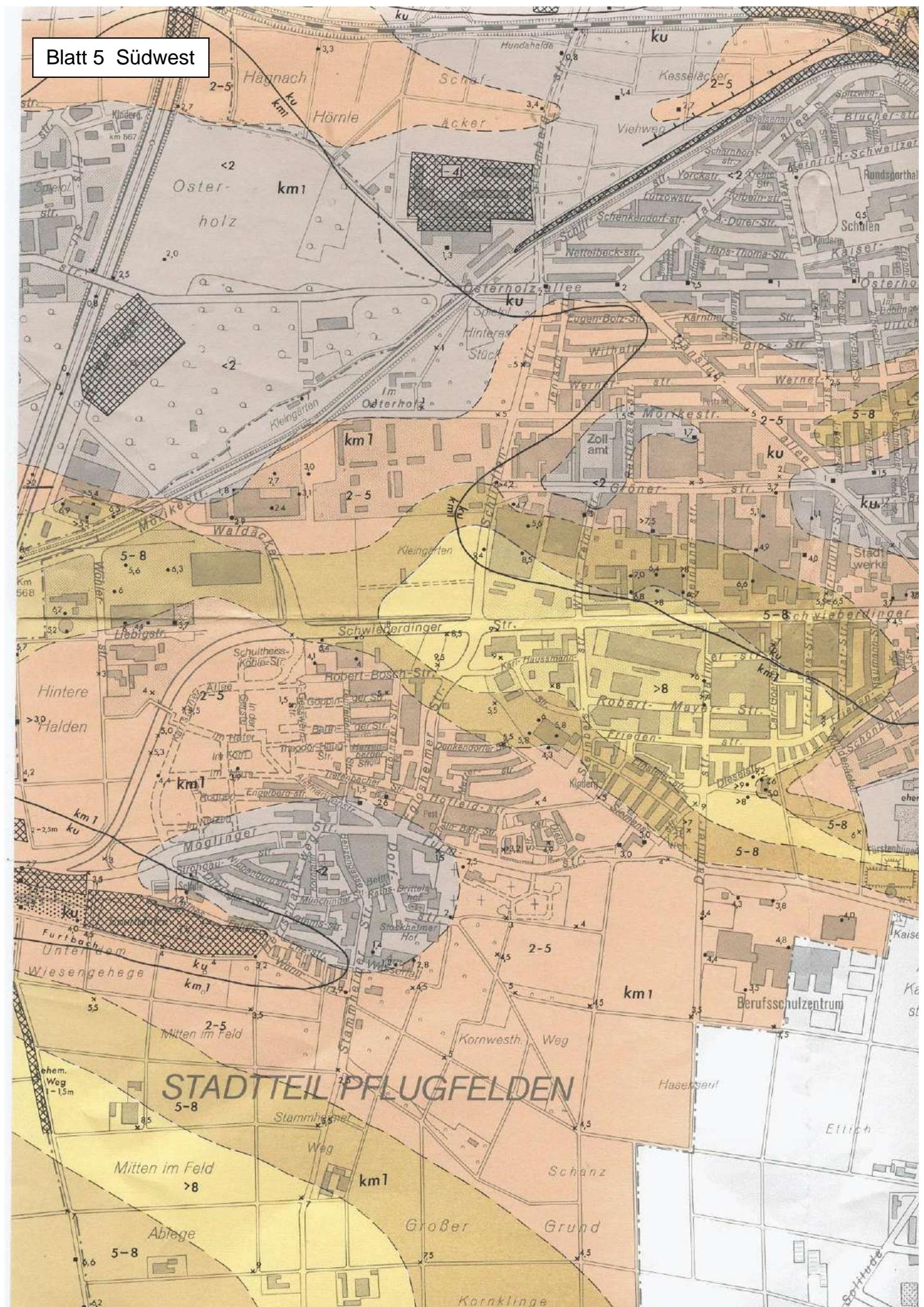
Blatt 3 Nord

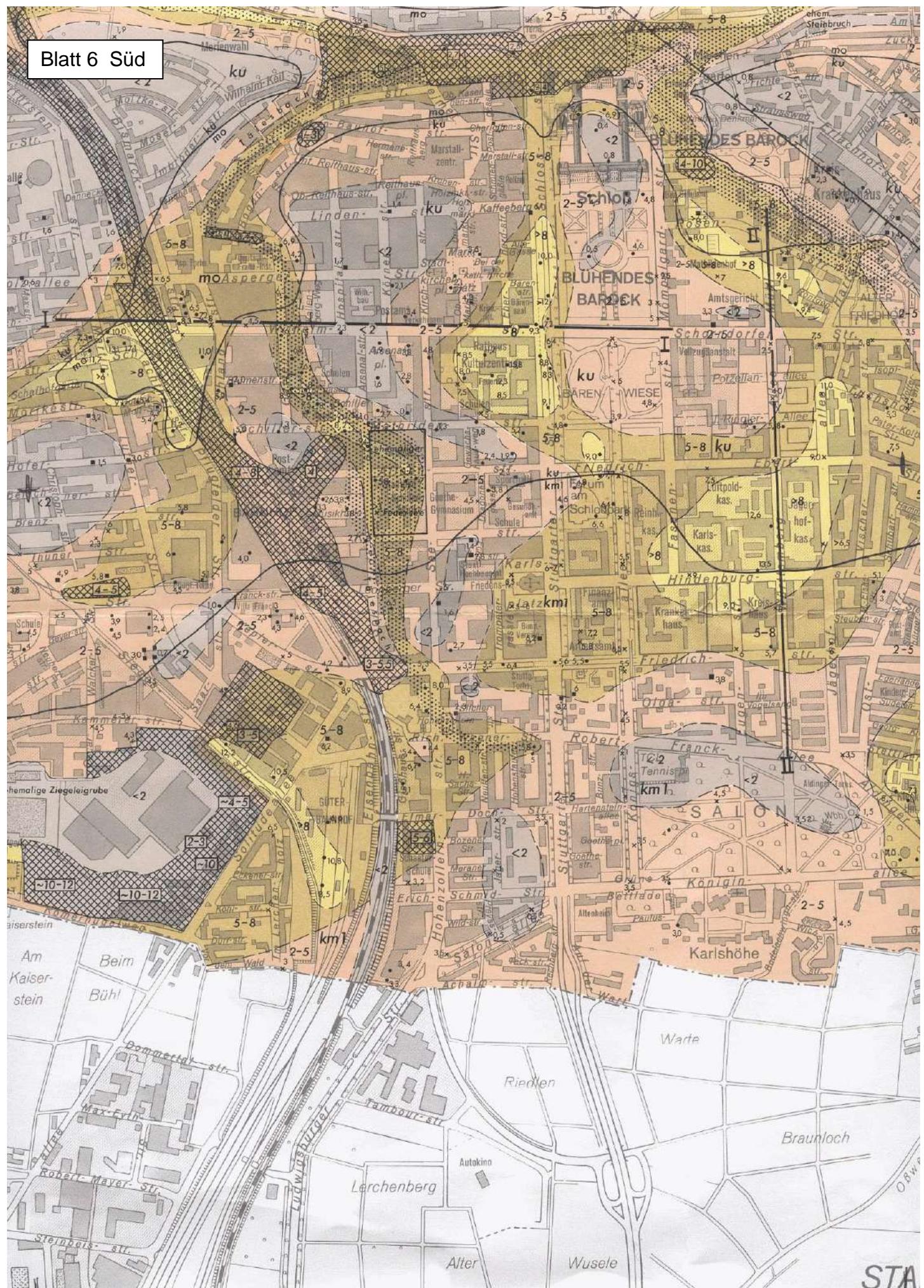


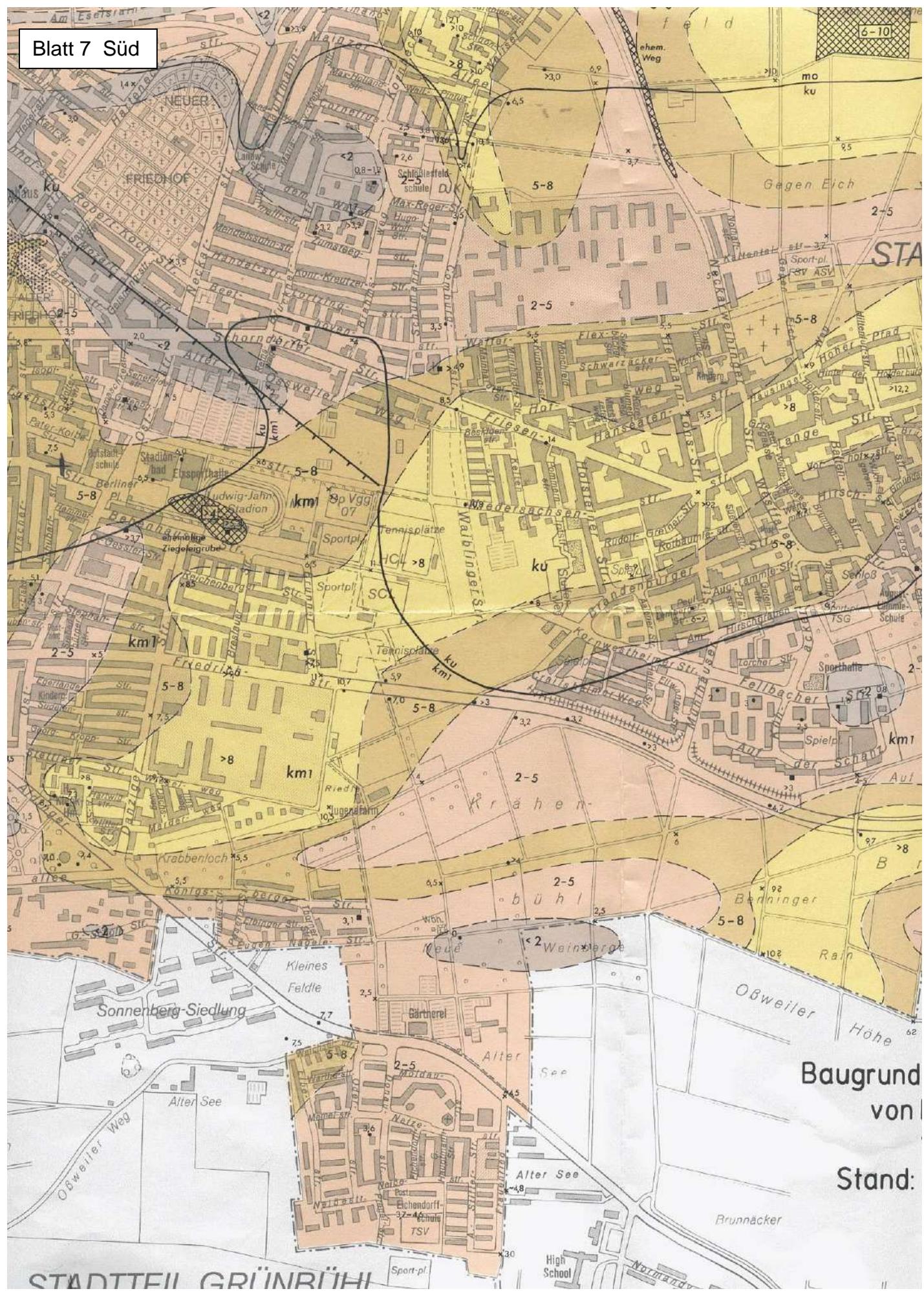
Blatt 4 Nordost



Blatt 5 Südwest







Blatt 8 Südost

