

# Planung, Bau und Überwachung einer geothermischen Anlage

**Dr. Axel Baermann**

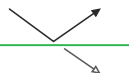
11. April 2023

**Veranstaltung vom**

**VDI Arbeitskreis Technische Gebäudeausrüstung**

**und VDI Arbeitskreis Umweltschutztechnik**

**gemeinsam mit dem Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Verein e.V.**



# Arten der Geothermie

## Oberflächennahe Geothermie (< 400 m)

- Anlagen in Deutschland: > 440.000
- Neu installierte Anlagen pro Jahr:
  - ca. 27.000 (in 2021)
- Anlagen für Kleinstgebäude bis hin zu Industriekomplexen
- Beeinflusst u. a. durch Klima, Grundwasser, Bebauung, lokale Geologie und Sedimente

## Tiefengeothermie (> 400 bis 6000 m)

- Anlagen in Deutschland: 41
- Heiz- bzw. Kraftwerke
- Komplexe Standortwahl
- Schwierige Ermittlung/Interpretation geophysikalischer Daten
- Potentiale abhängig vom geothermischen Gradienten (3 bis 5 K pro 100 m Tiefe), der Gesteinsart und gesteins-spezifischen Eigenschaften

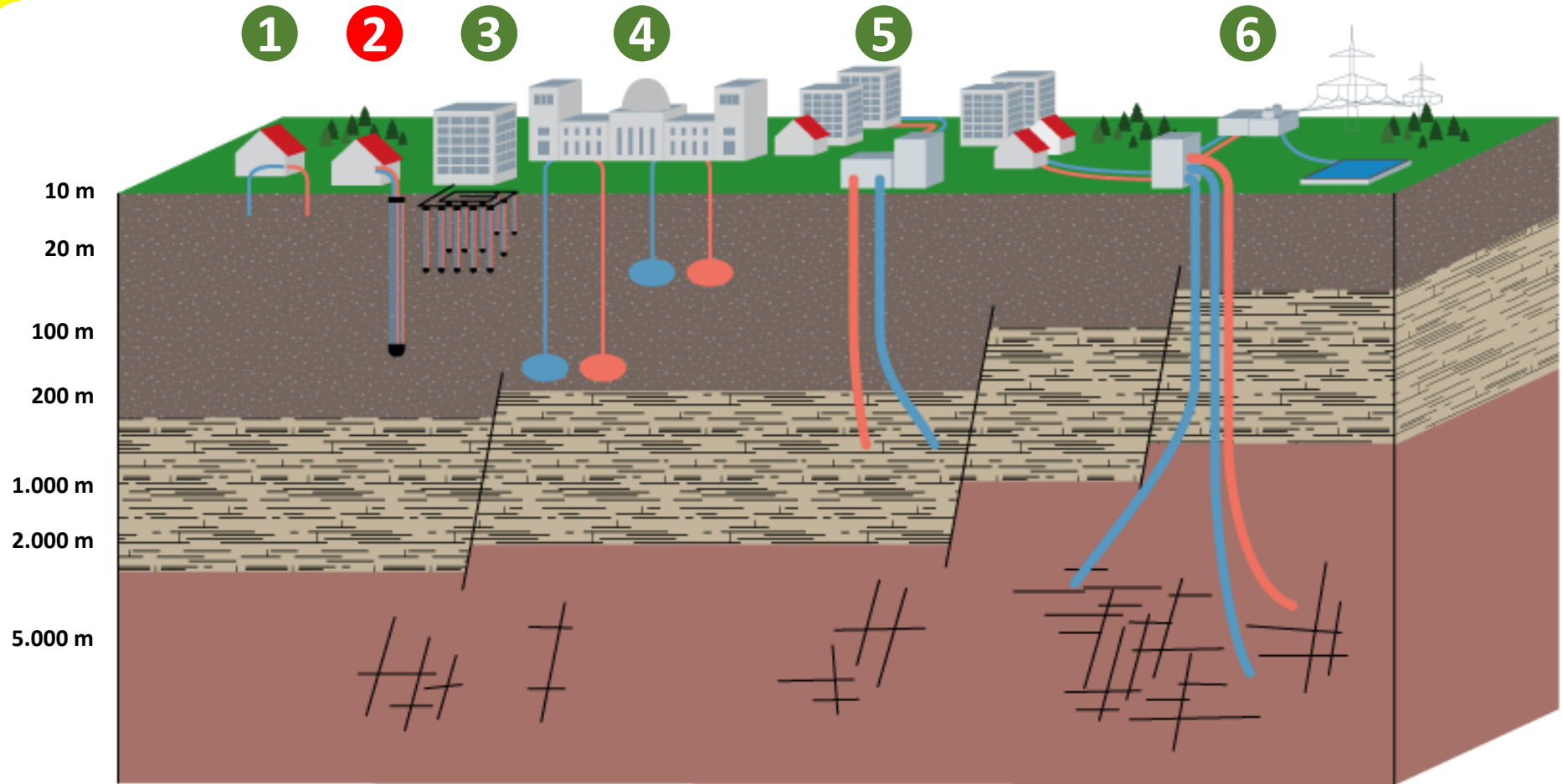
Stand 2022 (Bundesverband Geothermie)

Der Bereich von 400 bis 1500 m mit Temperaturen von 20 bis 60 °C wird meist als **Mitteltiefe Geothermie** bezeichnet.

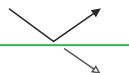
Quelle: Bundesverband Geothermie – Dez. 2020



# Unterscheidung der geothermischen Anlagensysteme

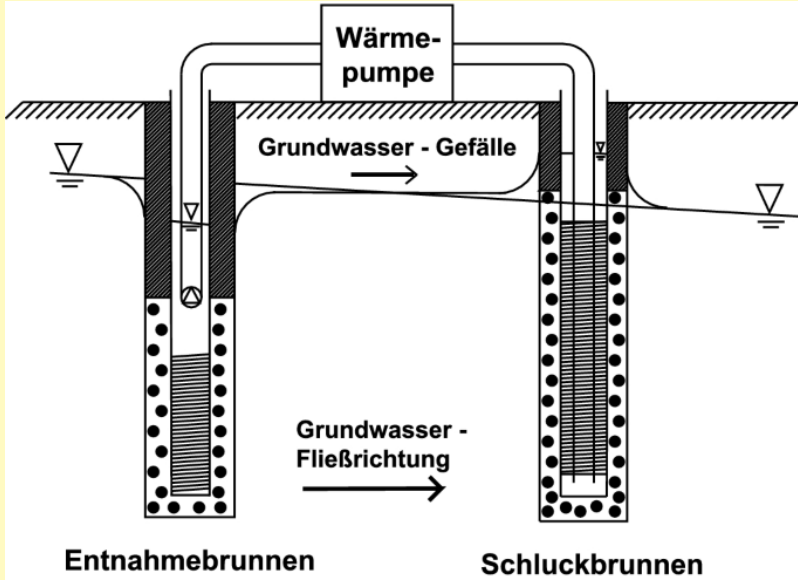


- 1, 2, 3** - oberflächennahe geschlossene **Flach-** bzw. **Tiefensysteme**:  
**Flächen-** bzw. **Grabenkollektor**, **Energiepfähle**, **Wärmekörbe**, **Erdwärmesonden (EWS)**, Grundwasser-Brunnenanlage (offenes System)
- 4, 5, 6** - offene Tiefengeothermie: hydrothermale und petrothermale Systeme



# Differenzierung verschiedener, oberflächennaher geothermischer Systeme

## Grundwasser-Brunnenanlage



Quelle: Springer – Geothermie (2020), 3. Auflage

## Erdwärmesonden



Quelle: Energie-Experten.org

## Grabenkollektoren



Quelle: Jura-Kälte.de

## Wärmekorbe



Quelle: tab.de

## Energiepfähle



Quelle: Geopunkt.de

## Flächenkollektoren



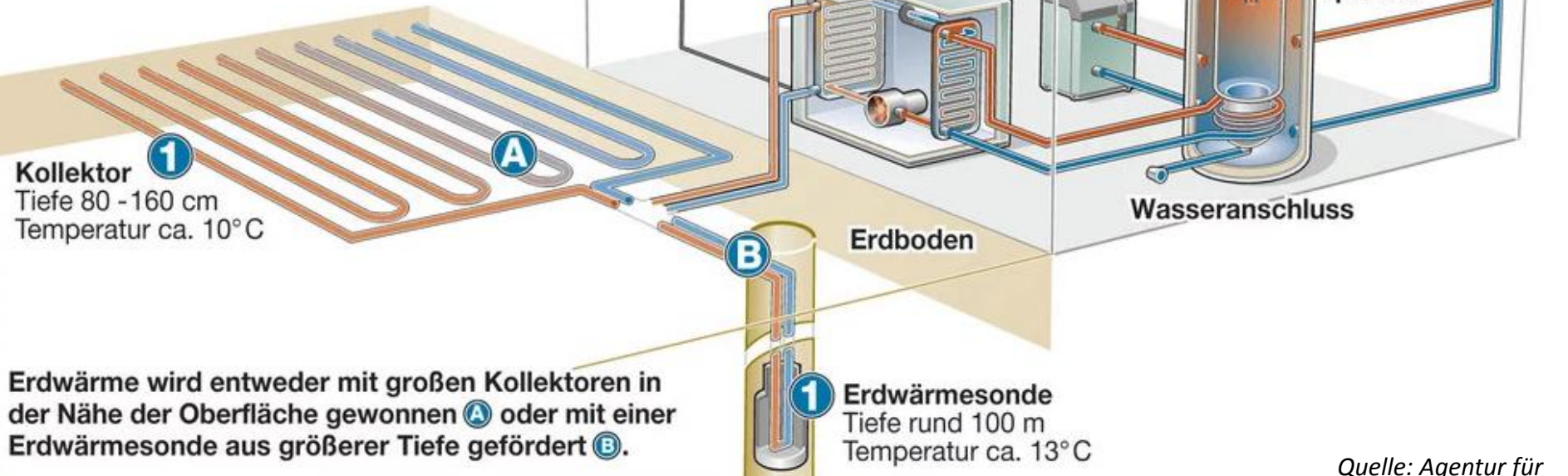
Quelle: FAU Erlangen

# Funktionsweise einer geothermischen Anlage (Kollektor- und Erdwärmesonde)

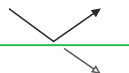
① Die Erde erwärmt kaltes Wasser, das durch Kollektor oder Sonde strömt, ein wenig.

② Eine Wärmepumpe entzieht dem Wasser die Wärme und verdichtet sie zu höheren Temperaturen. Wärmepumpen beruhen auf einem ähnlichen Prinzip wie Kühlschränke.

③ Die Erdwärme wird gespeichert und steht zum Heizen und zur Warmwasserbereitung zur Verfügung.



Quelle: Agentur für  
erneuerbare Energien



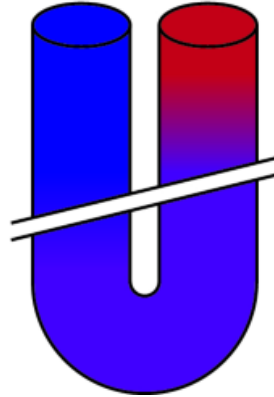
# Typen von Erdwärmesonden (EWS)

## Duplex-Sonde (Doppel U-Rohrsonde)

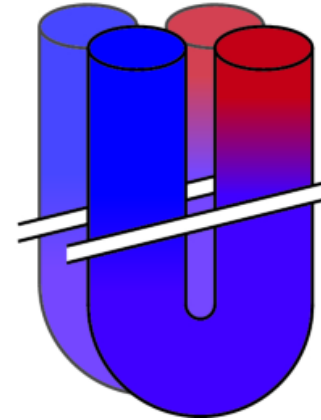


Quelle: Frank-GmbH.de

## Einfach U-Rohrsonde



## Doppel U-Rohrsonde



## Koaxialrohrsonde



Quelle: Springer – Geothermie (2020), 3. Auflage

↳ **Y-Stücke für Vor- und Rücklauf**

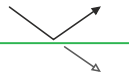


Quelle: Energie-Experten.org

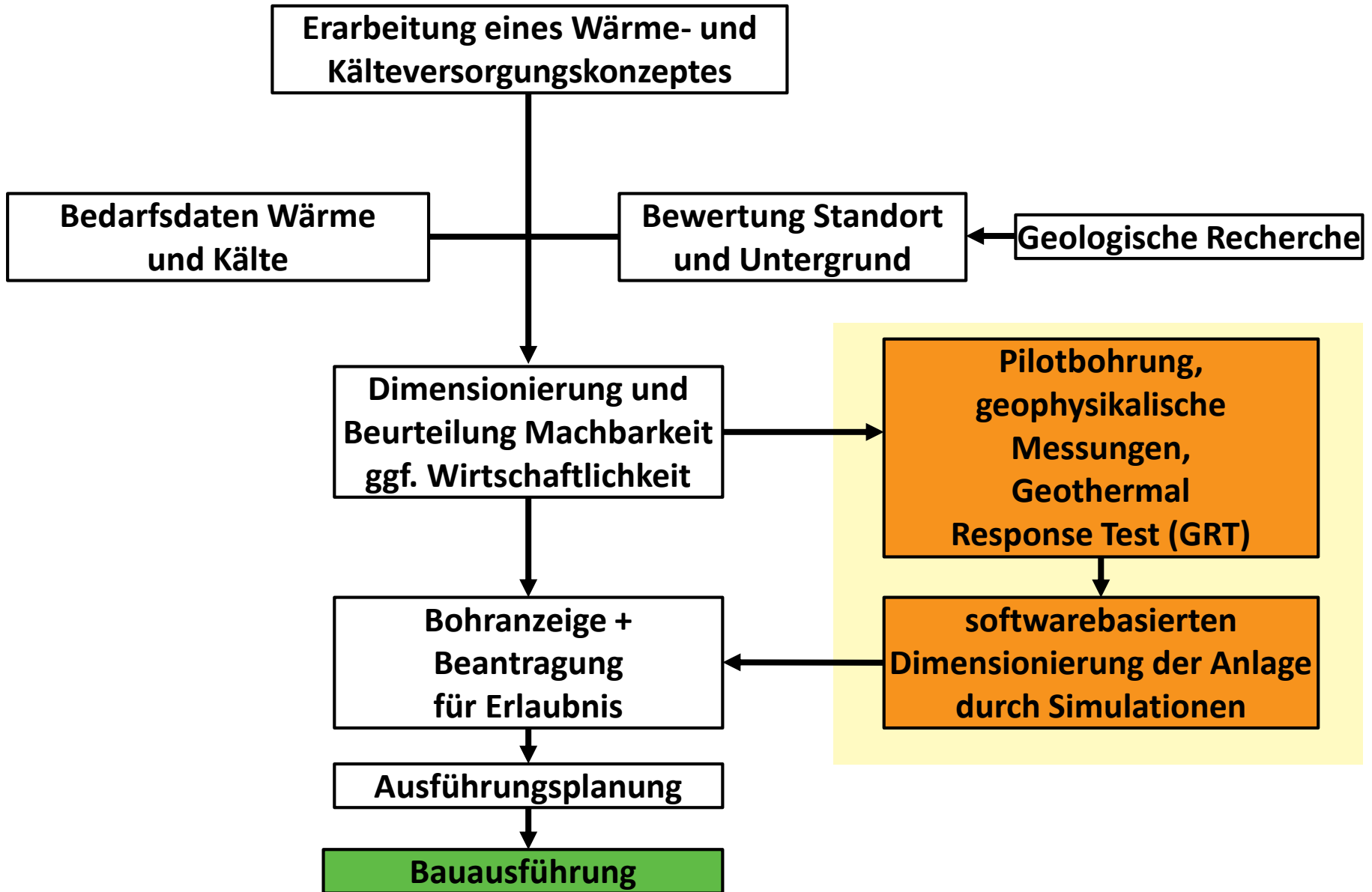
## Koaxiale Edelstahlsonde mit Förderschraube



Quelle: Baermann & Partner (B&P)



# Ablaufschema zur Planung einer Geothermischen Anlage



## Klärung zur grundsätzlichen Genehmigungsfähigkeit zur Errichtung einer geothermischen Anlage (wasserrechtliche Restriktionen)

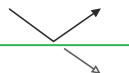
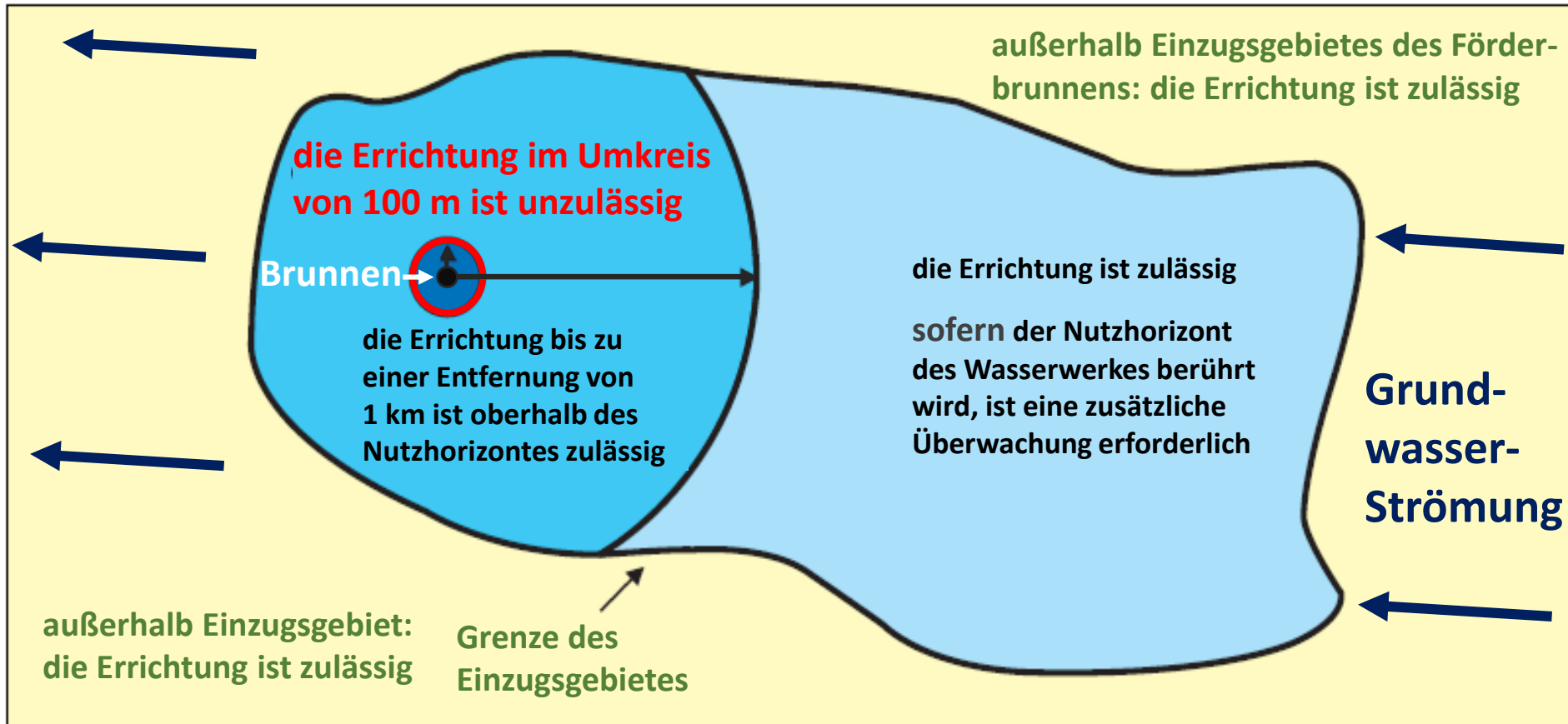
- Lage des Grundstücks innerhalb oder außerhalb von Trinkwasserschutzgebieten
- Entfernung zu Grundwasser-Förderbrunnen im Umfeld des Grundstücks
- Begrenzung der Bohrtiefen durch Lage der Deckschichten zum Grundwasserleiter
- Altlastenverdacht oder Bodenkontaminationen auf dem Grundstück
- Nachweis der Kampfmittelfreiheit zur Durchführung von Bohrungen
- Nutzbare Freiflächen auf dem Grundstück für Erdwärmesonden bzw. Sondenfelder
- Naturschutz-Aspekte auf den Freiflächen (geschütztes Biotop, Betretungsverbote)





# Vorplanung – Prüfung der Strömungssituation für eine Errichtung

## Räumliche Abgrenzung in Trinkwassereinzugsgebieten



# Vorplanung - Wasserrechtliches Prüfschema für eine Errichtungs-Genehmigung



## Vorgehensweise zur Erfassung des geologischen Untergrundaufbaus

Auswertung bestehender Bohrungen im Umfeld des Grundstücks (Bohrdaten-Portale)

Auswertung von geologischen Karten (Geologische Landesämter, Fachbehörden etc.)

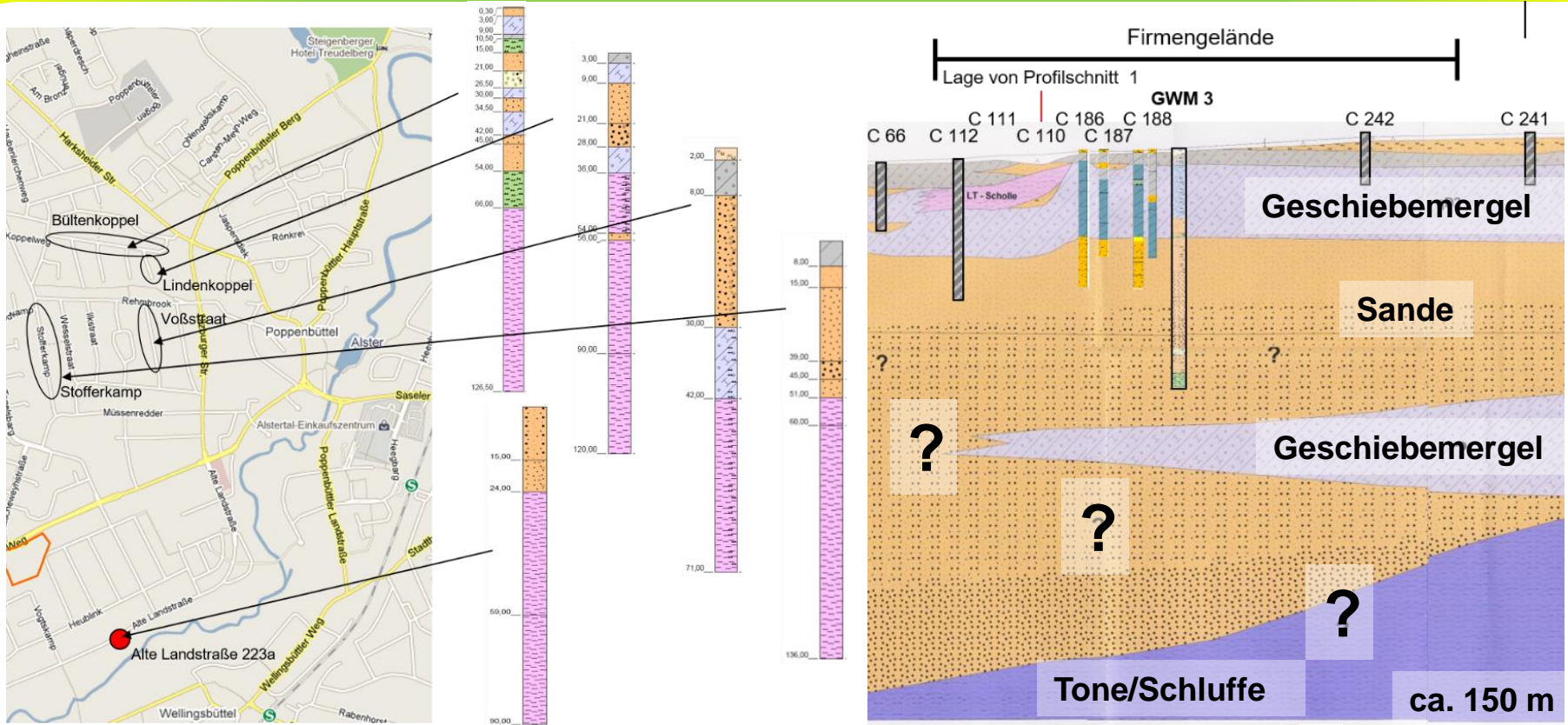
Auswertung von Datensätzen zur Abschätzung der Grundwasserströmungsverhältnisse

Erfassung von Bodenkontaminationen (Recherchen zu Lage, Tiefe, Kontaminationsgrad etc.)

Recherchen zu bereits bestehenden geothermischen Anlage im weiteren Umfeld



# Vorplanung – Nutzung von Bohrdaten im Umfeld des Standortes (Archivdaten)



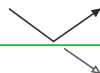
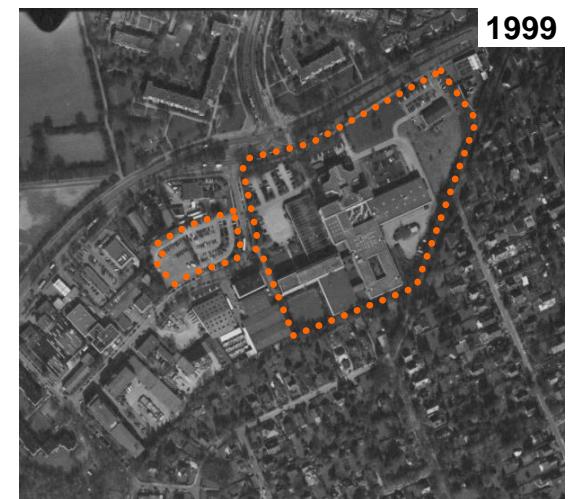
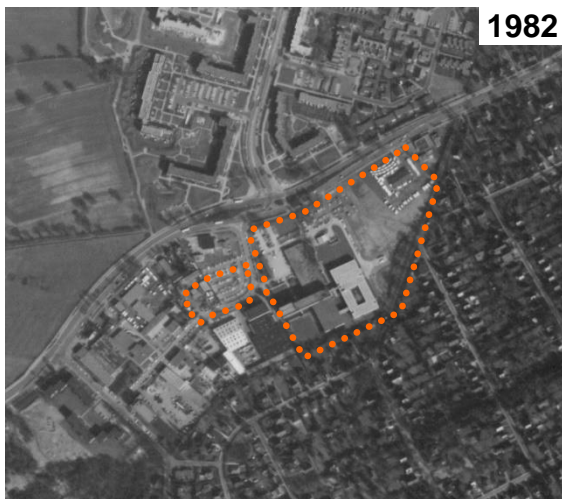
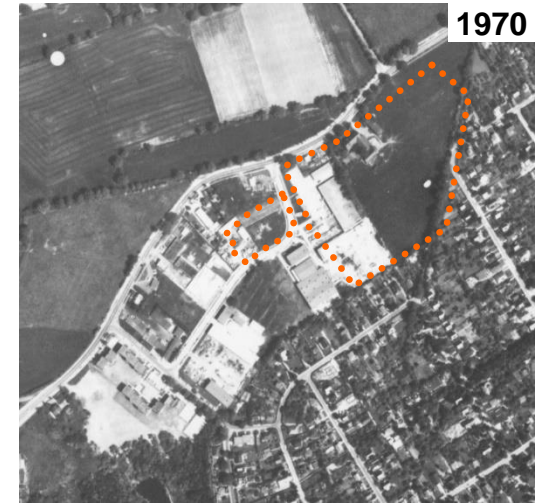
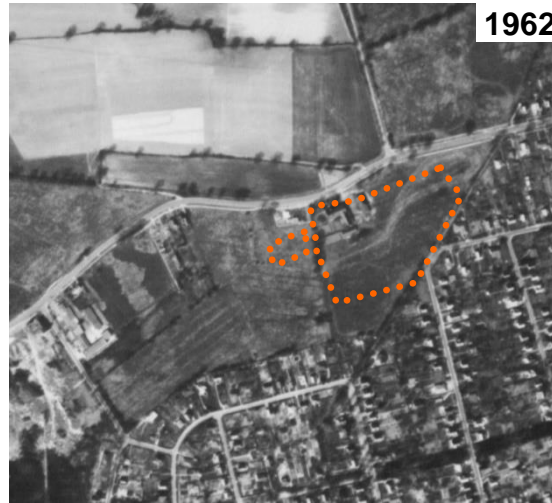
## Nutzung von Informationen aus Bohrungen (Anzeigepflicht gemäß Geologiedatengesetz!)

- Gewinnung erster Erkenntnisse zum möglichen Untergundaufbau auf dem Grundstück
- Abschätzungen zur Mächtigkeit des nutzbaren Grundwasserleiters
- Vermutungen zur Lage der Deckschichten und zur Lage von tieferen Grundwasserstockwerken

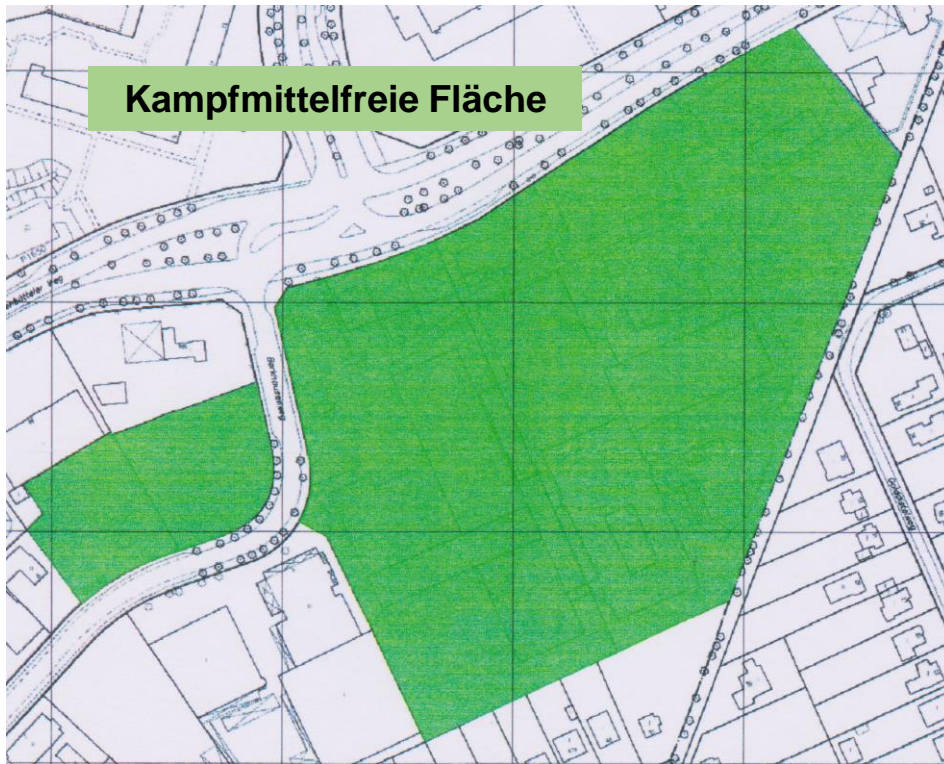
**Fazit:** Durchführung von **Erkundungsbohrungen** auf dem Grundstück, **sofern Kampfmittelfreiheit nachgewiesen ist!**

# Vorplanung – Prüfung auf Altlasten und Kampfmittelverdacht

Luftbildauswertungen für Altlasten- und Kampfmittelverdachtsfälle sowie die historische Bebauungs-/Nutzungssituation zum Erhalt der Bohrgenehmigung



# Vorplanung – Anträge auf Gefahrenerkennung und Luftbildauswertung



**Kampfmittelfreie Fläche**

Diese Umrandung kennzeichnet die **von Ihnen beantragte Fläche**. Für alle Flächen innerhalb dieser Umrandung, in denen lediglich die Liegenschaftskarte dargestellt ist, ist noch **keine Gefahrenerkennung/ Luftbildauswertung** erfolgt. Bauliche Maßnahmen nach §2 HBauO dürfen innerhalb dieser Fläche nicht durchgeführt werden.




## Flächen ohne Kampfmittelverdacht


 **Kampfmittelfreie Fläche** gemäß §8 (1) KampfmittelVO


Es besteht nach Luftbildauswertung/ Fernerkundung **kein Hinweis** auf Bombenblindgänger oder vergrabene Kampfmittel aus dem II. Weltkrieg. Nach heutigem Kenntnisstand sind keine weiteren Maßnahmen notwendig.


## Flächen ohne abschließende Klärung


 Es haben Arbeiten nach §8(1) KampfmittelVO stattgefunden, die nicht zu einer abschließenden Kampfmittelfreiheit geführt haben. **Beachten Sie die Erläuterungen im Kartenblatt.**

## Flächen mit Kampfmittelverdacht

 Es besteht der **Verdacht** auf vergrabene Kampfmittel. Die Luftbildauswertung ergab jedoch **keine Hinweise** auf Bombenblindgänger aus dem II. Weltkrieg.

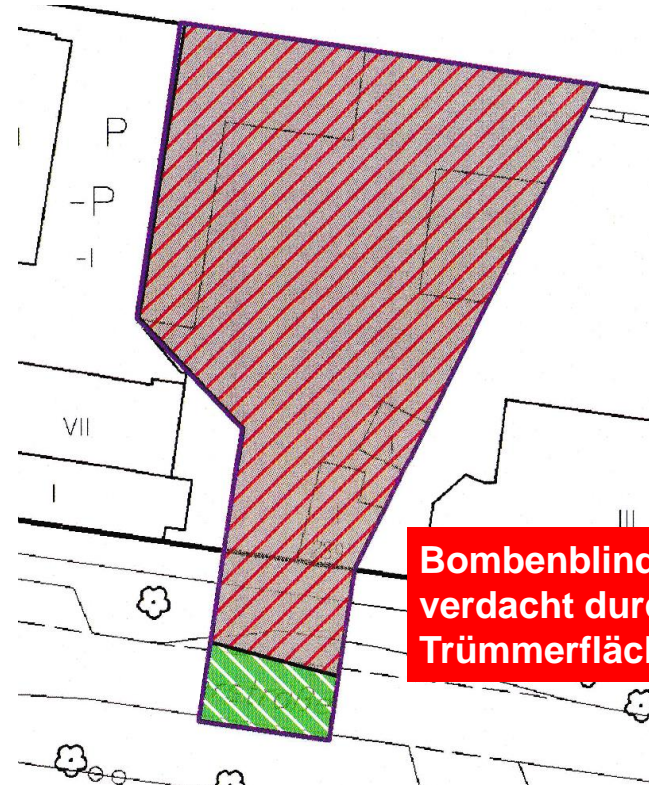
 Es besteht der **Verdacht** auf vergrabene Kampfmittel. Des Weiteren besteht der **allgemeine Verdacht auf Bombenblindgänger** aus dem II. Weltkrieg.

 Es besteht der **Verdacht** auf vergrabene Kampfmittel. Auf gelb dargestellten Flächen **ohne rote** oder **grüne** Schraffur ist zusätzlicher **Bombenblindgängerverdacht** nicht auszuschließen. Wir empfehlen hier eine **Luftbildauswertung/ Gefahrenerkennung** zu beantragen.


 Es besteht **allgemeiner Bombenblindgängerverdacht** durch einen registrierten Verdachtspunkt.

 Es besteht **allgemeiner Bombenblindgängerverdacht**.


 Es besteht **allgemeiner Bombenblindgängerverdacht** durch Trümmerflächen.




**Bombenblindgängerverdacht durch Trümmerflächen**

 Es besteht **allgemeiner Bombenblindgängerverdacht** durch nicht abgesuchte ehemalige **Wasserflächen**.

 Es besteht **allgemeiner Bombenblindgängerverdacht** durch **Bombenkrater**.

 Für Verdachtsflächen mit dieser Umrandung liegt ein **Bürgerhinweis** vor.

 Es besteht **Kampfmittelverdacht** aufgrund einer **angemessenen Anomalie**.

 Es besteht **Kampfmittelverdacht** aufgrund von **Sondierungsergebnissen**.

Lageplan nur in Verbindung mit der Stellungnahme gültig.

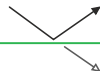
Kartenblatt		Koordinatengitter: Gauß-Krüger Lagestatus: 100
1 von 1		

Maßstab: 1:1.000

## Messungen mit der Ferex-Sonde zur Freigabe von Bohrungen



Prüfung auf Kampfmittel im Bohrloch durch ein Fachunternehmen. Die „Ferex-Sonde“ detektiert Metalle im Untergrund, sodass damit Blindgänger und andere Kampfstoffe erfasst werden können. Entsprechend können dann Bohrungen schrittweise freigegeben werden (Durchführung: z. B. über Fa. HKB, Hamburg).



# Planung und Bau – Durchführung einer Testbohrung



**Niederbringen einer Spülbohrung bis 220 m Tiefe unter Beachtung und Schutz des alten Baumbestandes**



**Beprobung der Bohrung und Auslegung des Bohrgutes für die sedimentologische Ansprache sowie die Erstellung von Schichtenverzeichnissen und Bohrprofilen.**

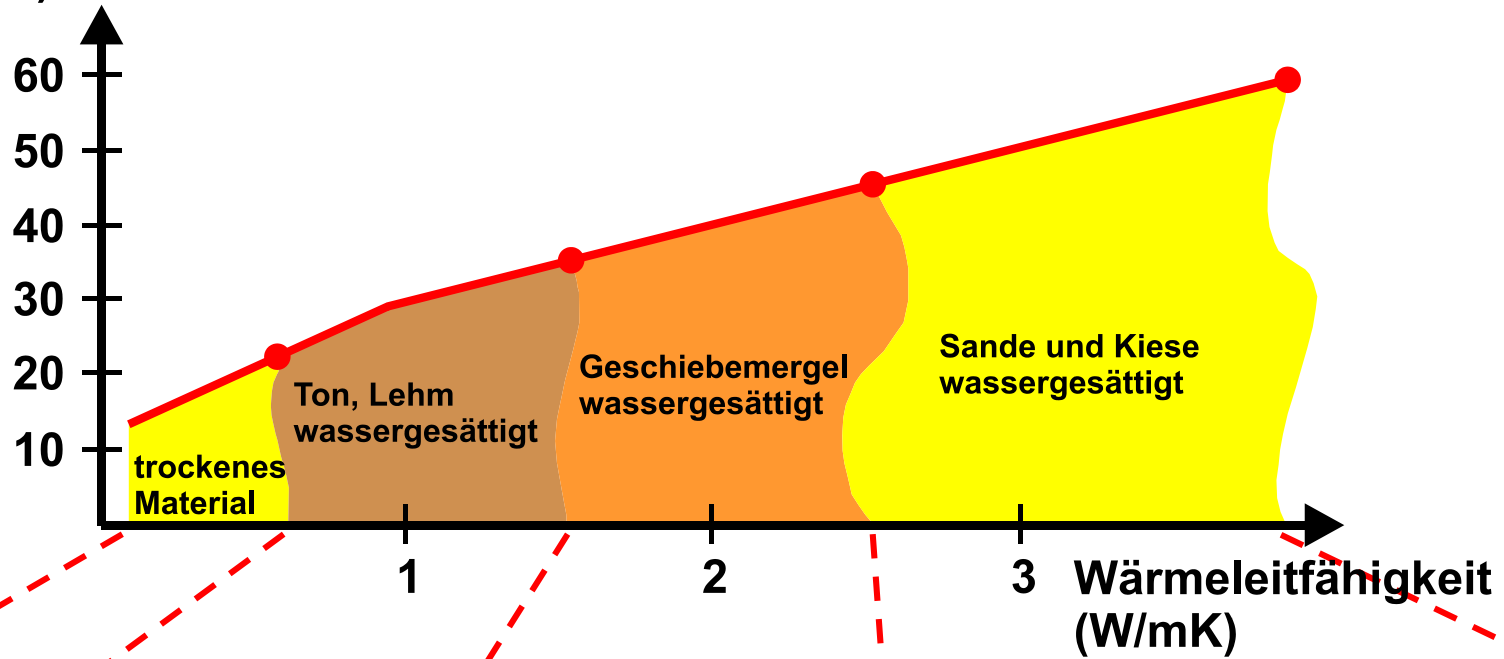
**Entnahme des Bohrgutes aus der Bohrung über 3 m Bohr-Tiefe oder auch bei Schichtwechsel bzw. bei Auffälligkeiten (Korngrößen - oder Farbwechsel, Hindernisse, Steine, Kalkbänke etc.).**





nach VDI 4640

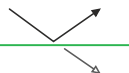
Entzugsleistung  
(W/m)



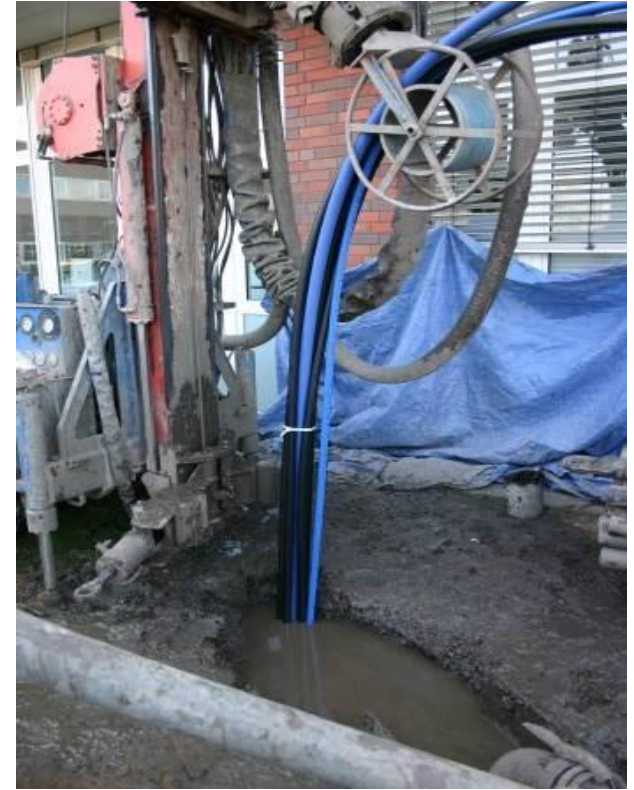
<b>Wärme-Entzugsleistung ist zusätzlich abhängig von:</b>	<b>Resultierende Eigenschaften auf die gesteinspezifischen Parametern</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Korngrößenzusammensetzung</li><li>• Gesteins- und Mineralzusammensetzung</li><li>• Korngerüst-Dichte / Zementationen</li><li>• Feucht- und Trockendichte</li><li>• Porenraum</li><li>• Porenverteilung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mittlere Wärmeleitfähigkeit</li><li>• Spezifische mittlere Wärmekapazität</li><li>• Effektive Porosität</li><li>• Durchlässigkeitseigenschaften (<math>k_f</math>-Werte)</li></ul>

**Für die numerischen Berechnungen und Simulationen werden neben den Bohrprofilen und den daraus konstruierten Profilschnitten auch die bodenphysikalischen und geotechnischen Kenndaten benötigt!**

**Es werden jeweils Min.- und Max.-Werte als „Worst Case“ Abschätzungen eingesetzt. Diese können als Labordaten vorliegen oder durch Felddaten ermittelt werden (z. B. durch Geothermal Response Tests, Abpumpversuche an Grundwasser-Messstellen etc).**

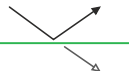


# Planung und Bau – Einbau einer Test-Erdwärmesonde in die Bohrung



Zuführung der **Duplex-Erdwärmesonde** (schwarze Leitungen) sowie eines **Temperatur-Messrohres** (große blaue Leitung). Das dünnere, blaue Verpressrohr dient zum Einbringen des Verpressmaterials in das Bohrloch für die Anbindung der Sondenleitungen an den Boden bzw. an die Sedimente und zur Abdichtung zwischen verschiedenen Grundwasser-Stockwerken.

Die Testsonde ermöglicht neben geophysikalischen Messungen zur genaueren Schichtlagen-Bestimmung auch die **Durchführung eines Geothermal Response Tests** zur Bestimmung der tatsächlichen, effektiven Wärmeleitfähigkeit im Untergrund auf dem Standort.

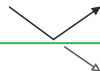


## Direkte Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit im Untergrund

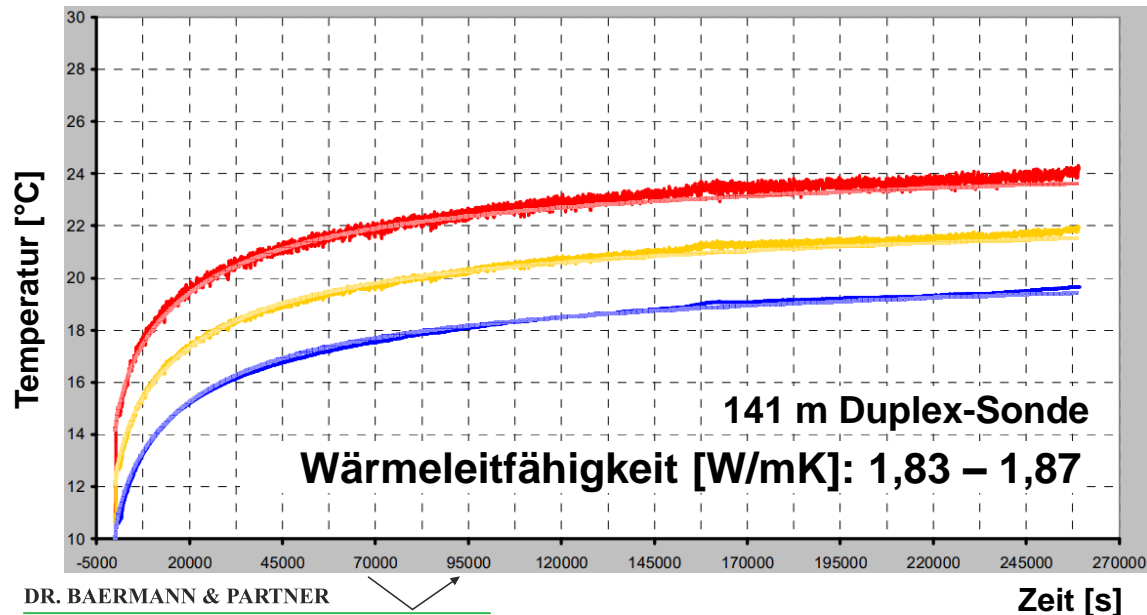
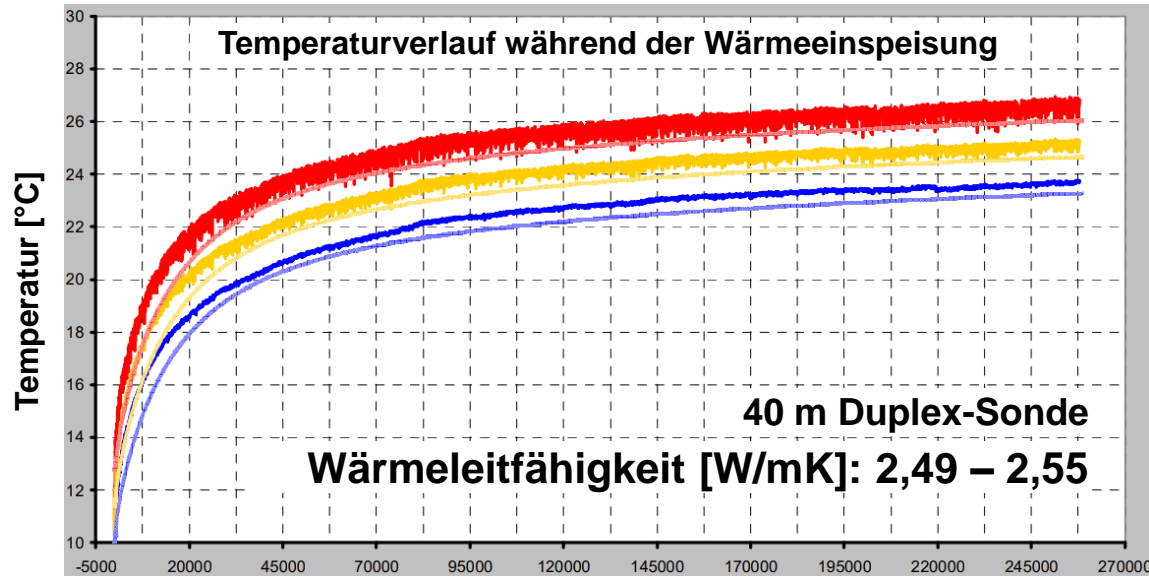


**Anschluss der Test-Duplex-Erdwärmesonde an die TRT-Messstation (Pumpe, Heizelemente und Sensor-Systeme) zur Datenaufnahme (Durchführung: Fa. HSW, Rostock).**

**Erfassung der Temperatur-Entwicklung im Untergrund zur Erstellung von Tiefenprofilen und der Bestimmung der mittleren Erdreichtemperatur sowie zur Überwachung der Anlage (Durchführung: B&P, Hamburg).**



## Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit für flache und tiefe Bereiche



Die Erdwärmesonde wird an eine Umwälzpumpe und ein Heizelement angeschlossen. Das Wärmefluid (Wasser) wird zunächst im Kreislauf geführt bis die Temperatur im ungestörten Untergrund erreicht worden ist, sodass dann das Heizelement zugeschaltet werden kann. Das erwärmte Wasser strömt durch die Sonde und kühlt sich ab. Die Austritts-Temperatur wird gemessen. Das Wasser wird erneut aufgeheizt und wieder in den Kreislauf eingespeist.

Aus den Temperatur-Differenzen zwischen Vor- und Rücklauf lassen sich die effektive mittlere Wärmeleitfähigkeit der Sedimentschichten im Untergrund bestimmen.

In Vor- und Rücklauf der Duplex-Sonde gemessene Temperaturverläufe

— TVL — TRL — T mid

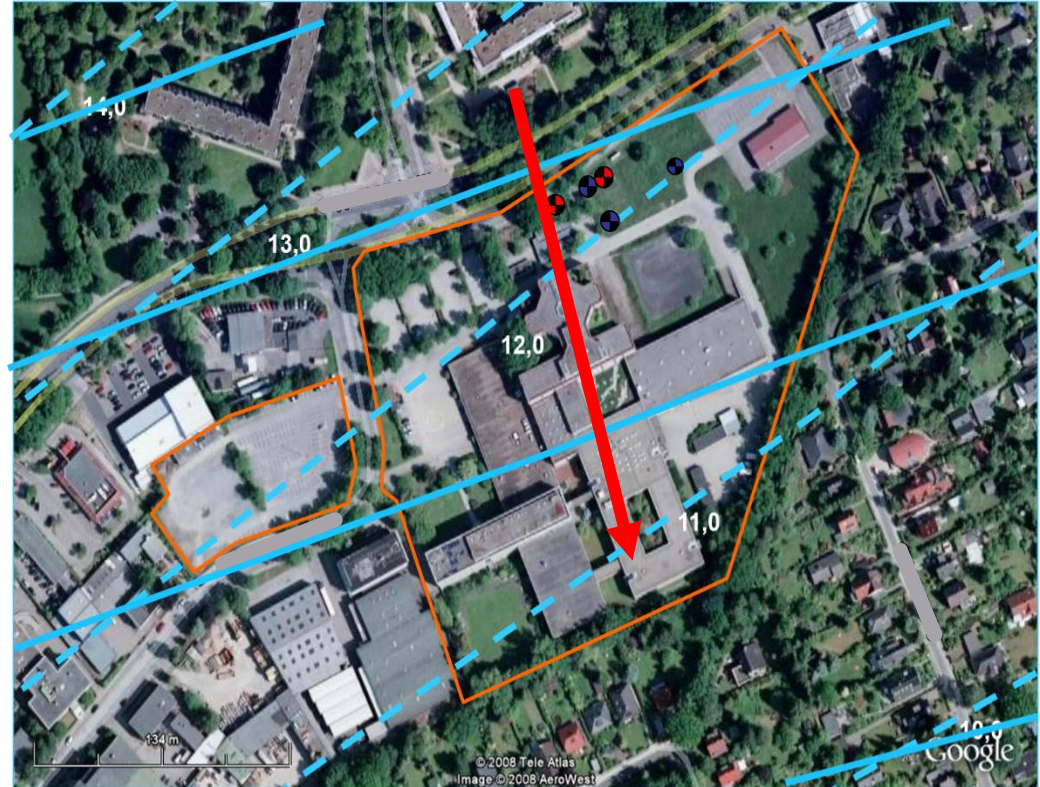
In Vor- und Rücklauf der Duplex-Sonde simulierte Temperaturverläufe

--- TVL Sim --- TRL Sim --- T mid Sim

# Planung - Ermitteln der Grundwasser-Strömungsrichtungen (aus Archivdaten)



(Quelle: Google maps 2008)



100 m  
1:2000

- Grundstücksgrenze Firmenkomplex
- - - Grundwassergleichen [mNN]
- ← Gemittelte Hauptströmungsrichtung

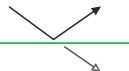
**Bestimmung der Grundwasserströmungs-Richtungen und Verlauf der Grundwassergleichen sowie die Lage des Vorfluters (linke Abbildung) und Ableitung der Strömungsrichtungen für das Firmengeländes (rechte Abbildung) aus Archivdaten.**



# Bau – Herstellung von Grundwasser-Messstellen durch Spülbohrungen



**Ausführung von Spülbohrungen zur Herstellung von 2 Zoll-Grundwasser-Messstellen für die Ermittlung der Grundwasser-Fließrichtung (hydraulisches Dreieck) sowie für die spätere Überwachung der geothermischen Anlage zur Einhaltung der Grundwasser-Temperaturen. Spülbohrungen ermöglichen keine genaue Schichttiefen-Zuordnung!**



# Planung und Bau – Bohrungen für den Bau von Grundwasser-Messstellen



**Abteufen von Kernbohrungen zur Ermittlung genauer Schichtenprofile und Herstellung von großen Grundwasser-Messstellen zur Bestimmung der Grundwasser-Fließrichtung und den Durchlässigkeits-Beiwerten (linkes Foto) sowie für die spätere Überwachung der geothermischen Anlage.**

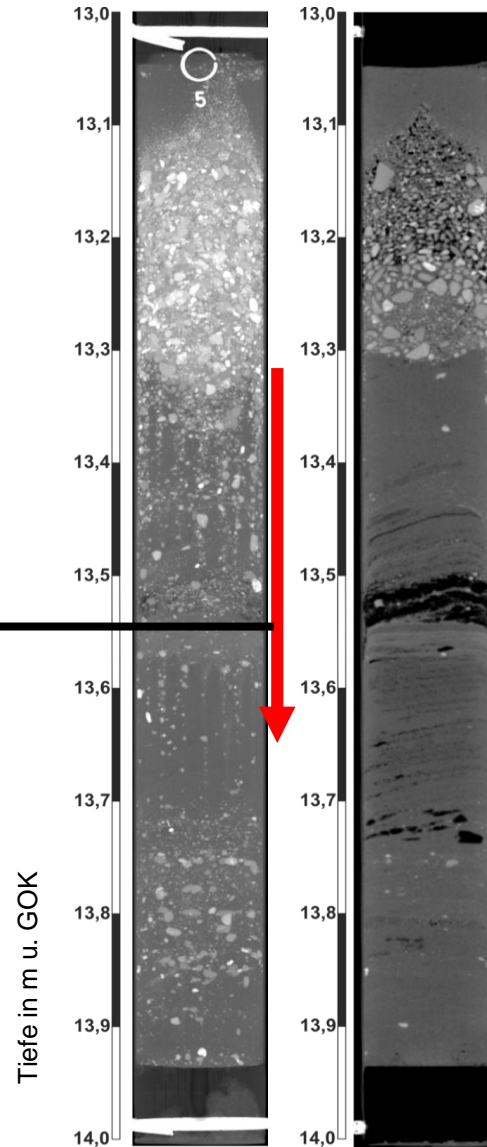
**Bohrgut-Beprobungen an einer Bohrschnecke (nur einsetzbar in der ungesättigten Zone) zur genauen Bestimmung der sedimentologischen und der geotechnischen Eigenschaften (Durchführung: Fa. Peter Neumann, Eckernförde und Fa. B&P, Hamburg).**





# Bau – Überwachung der Bohrkernqualitäten durch 3D Computertomographie

**Verfälschung der Schichtmächtigkeiten und damit der tatsächlichen Entzugsleistungen**



**Bohrkern aus der gesättigten Zone (Wasserleiter) in 13 – 14 m Tiefe**

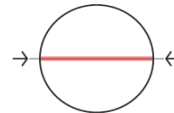
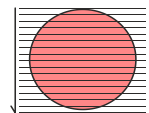
**Grobkies-Horizont und Identifikation von Nachfall (bis 20 cm Mächtigkeit) im oberen Bohrkerndabschnitt**

**Nachweis von Veränderungen in den Schichtlagen („Verbiegungen“) und teilweise Abriss der Kernstrecke**

**Gestapelte Scan-Längsschnitt-Aufnahmen über den gesamten Bohrkern für 3D-Bild (linkes CT) und Einzel-Scan-Aufnahme aus der Bohrkern-Mitte (rechtes CT-Bild)**

**Nachweis von Kies-Verschleppungen im Randbereich des Bohrkerns bis 40 cm**

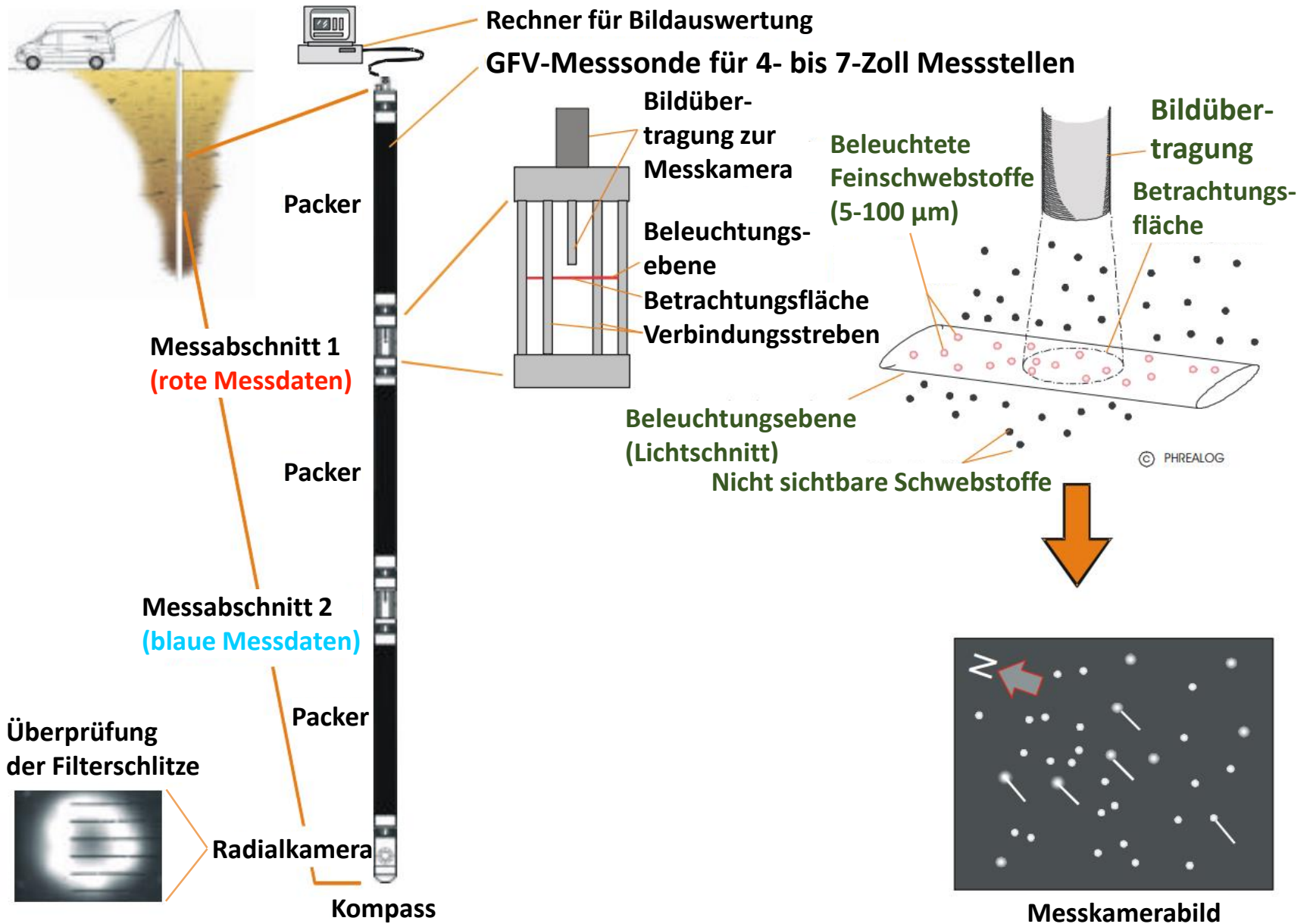
Tiefe in m u. GOK



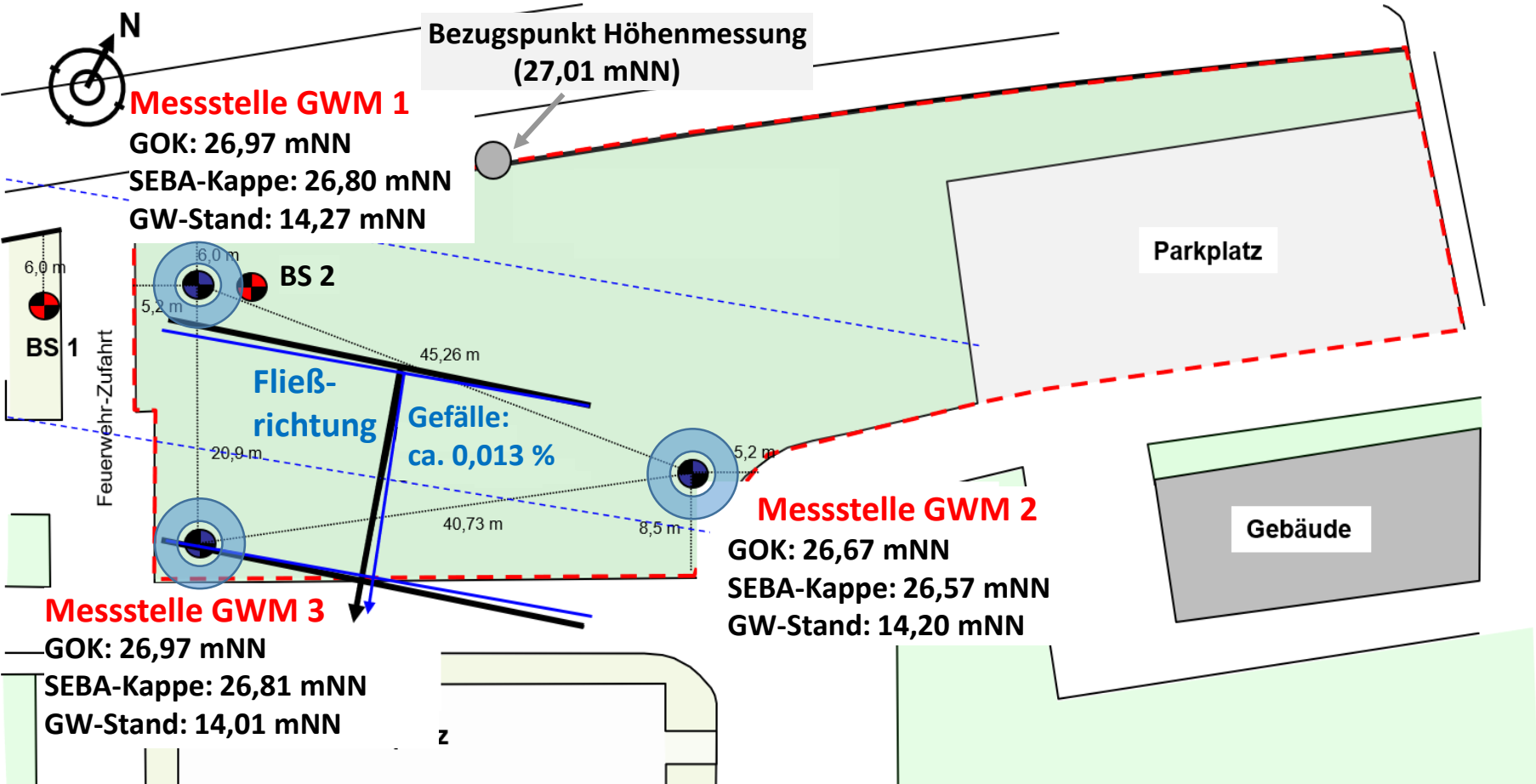
**Bereich der dargestellten Längsschnittbildserie**



# Planung - GFV-Messverfahren (Grundwasser-Fließ-Visualisierung)



# Planungsphase – Bestimmung der Grundwasserströmung auf dem Grundstück

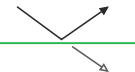
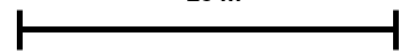


**Legende:**

- Kleinrammbohrung
- Grundwassermessstelle (GWM) mit Messpunkt OK-SEBA-Kappe (mNN)
- Geplante Freiflächen für ein Erdwärmesonden-Testfeld
- Grundwassergleichen (mNN)

Lageskizze der Bohrsondierungen BS 1 und BS 2 sowie der Messstellen GWM 1, 2 und GWM 3

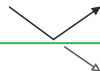
25 m



# Planung – Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte durch Pumpversuche



Einbringen einer leistungsfähigen Grundwasser-Förderpumpe in die Grundwasser-Messstelle für einen Abpumpversuch zur Erzeugung eines Absenktrichters. Registrierung der Wiederanstiegszeiten des Grundwassers nach dem Abpumpvorgang zur Berechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte (**ermittelte  $k_f$ -Werte:  $1,1$  bis  $1,4 \times 10^{-4}$  m/s**) und Vergleich mit den Wiederanstiegszeiten in zwei weiteren, benachbarten Grundwasser-Messstellen.



## Vorgehensweise zur Dimensionierung der Erdwärmesonden-Felder

- **Abschätzung der Heiz- und Kühlbedarfe für das Gebäude**
- **Erfassung des Untergrundaufbaus (Sedimente und Gesteinsschichten)**
- **Berechnung der Entzugsleistungen aus den Sediment- und Gesteinseigenschaften**
- **Abschätzungen zur benötigten Erdwärmesonden-Anzahl**
- **Festlegung der genehmigungsfähigen Bohrtiefen bzw. Sondenlängen**
- **Konzeption von Sondenfeldern (Sondenanzahl, Sondenlänge, Sondenabstände etc.)**
- **Abschätzungen zu den resultierenden Flächenansprüchen bzw. Sondenfeldgrößen**
- **Berechnungen und Simulationen zu erzielbaren Entzugsleistungen**
- **Wirtschaftlichkeitsberechnungen (Kostenaufwand zu Heiz- und Kühlleistung)**
- **Prüfung von Fördermöglichkeiten (z. B. Zuschüsse von Bund- und Landesmitteln)**



## Bebauung [m<sup>2</sup>]

- Bestehende Flächen und Gebäude
- Geplante und bereits genehmigte Gebäude-Nutzungs-Flächen
- In Planung befindliche Gebäude

## Nutzbare Freiflächen [m<sup>2</sup>]

- Garten- und Erholungsflächen
- Reduzierte Grün- und Erholungsflächen durch zukünftige Bebauung
- Parkplatzflächen

## Jahresbedarf Wärme/Kälte [MWh/Jahr]

- Gesamt Wärmebedarf Bestands-Gebäude
- Gesamt Kältebedarf Bestands-Gebäude
- Kälte-Bedarfe von April/Mai bis Sept. über z. B. Kompressionskälte-Anlagen
- Kälte-Bedarfe durch freie Kühlung

## Prognose für den Jahresbedarf an Heiz- und Kühlleistung [MWh/Jahr]



# Planung – Erfassung der thermischen Verbräuche im Bestandsystem (Gebäude)

**Ein- bis Zwei-Familienhaus (Altbau – Neubau): Heizbedarf: ca. 10.000 bis 25.000 kWh**

**Mehrfamilienhaus (Altbau, 700 m<sup>2</sup>: 8 Wohneinheiten): Heizbedarf: ca. 85.000 bis 120.000 kWh**

**Bürogebäude mit Lager- und Betriebsflächen (Heiz- und Kühlbedarf):**

**Thermische Verbräuche für Heizung Gebäude  
in kWh (Messungen Energiemengenzähler)**

Monat	Zentrale [kWh]	Lager [kWh]	Produktion [kWh]	Summe [kWh]
Januar	39.603	34.974	34.348	108.924
Februar	36.729	26.244	30.576	93.548
März	32.425	23.676	23.748	79.848
April	28.005	20.104	20.421	68.530
Mai	17.748	13.339	9.171	40.257
Juni	6.351	5.216	2.976	14.543
Juli	5.319	5.291	3.013	13.623
August	6.544	6.788	3.492	16.824
September	6.877	7.878	4.082	18.838
Oktober	15.744	12.975	11.794	40.514
November	26.198	20.410	20.623	67.230
Dezember	37.538	30.037	28.480	96.055
<b>Gesamt</b>	<b>259.079</b>	<b>206.930</b>	<b>192.725</b>	<b>658.734</b>

**Thermische Verbräuche für Kühlung Gebäude  
in [kWh] (Messungen Energiemengenzähler)**

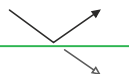
Monat	Zentrale [kWh]	Lager [kWh]	Produktion [kWh]	Summe [kWh]
Januar	2.267	7.247	5.487	15.001
Februar	2.087	6.483	5.005	13.575
März	2.437	8.063	5.415	15.915
April	4.387	8.219	5.464	18.070
Mai	5.859	8.831	5.246	19.936
Juni	11.947	13.129	11.117	36.193
Juli	13.904	13.013	11.677	38.594
August	7.865	11.179	7.091	26.135
September	6.381	10.509	6.199	23.089
Oktober	5.605	9.757	4.706	20.067
November	4.406	9.128	4.046	17.580
Dezember	3.299	8.666	3.745	15.710
<b>Gesamt</b>	<b>70.444</b>	<b>114.223</b>	<b>75.197</b>	<b>259.864</b>



Untergrund	Spez. Entzugsleistung [W/m]
<b>Allgemeine Richtwerte</b>	
Schlechter Untergrund (trockenes Sediment) ( $\lambda$ : < 1,5)	<b>25</b>
Normales Festgestein und wassergesättigtes Sediment ( $\lambda$ : 1,5 - 3,0)	<b>50</b>
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ : > 3,0)	<b>70</b>
<b>Böden, Sedimente und Gesteine</b>	
Kies, Sand trocken	<b>&lt; 25</b>
Kies, Sand wasserführend	<b>70 – 80</b>
Ton, Lehm feucht	<b>40 – 45</b>
Kalkstein (massiv)	<b>60 – 65</b>
Sandstein	<b>80</b>
Saure Magmatite (z. B. Granit)	<b>55 – 70</b>
Basische Magmatite (z. B. Basalt)	<b>35 – 55</b>
Gneis	<b>60 – 70</b>

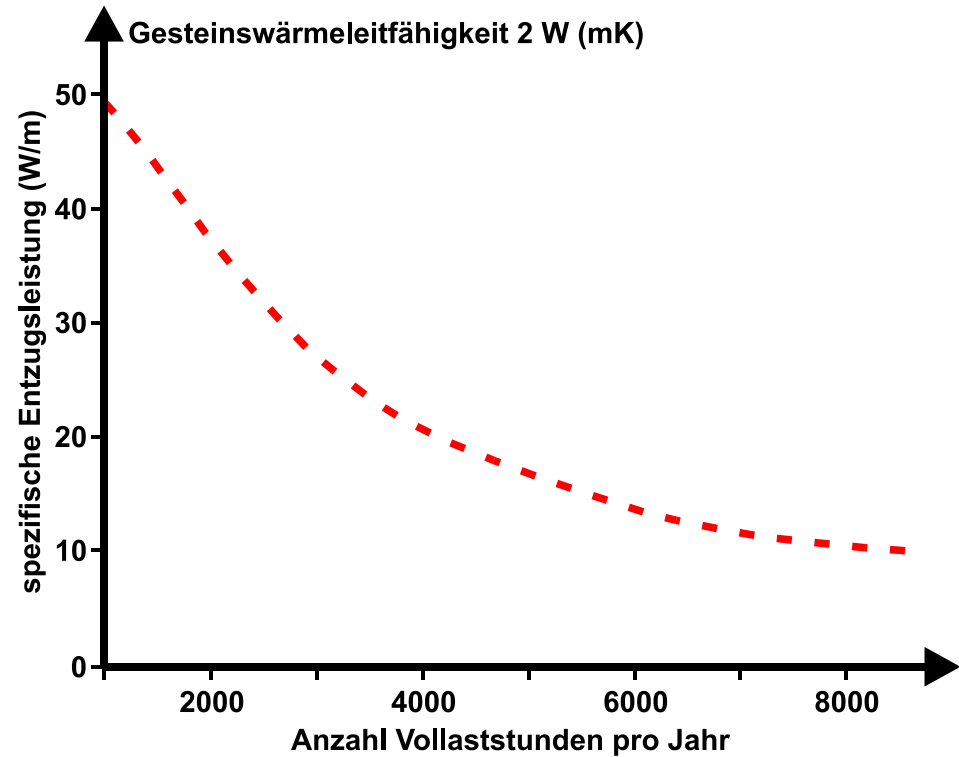
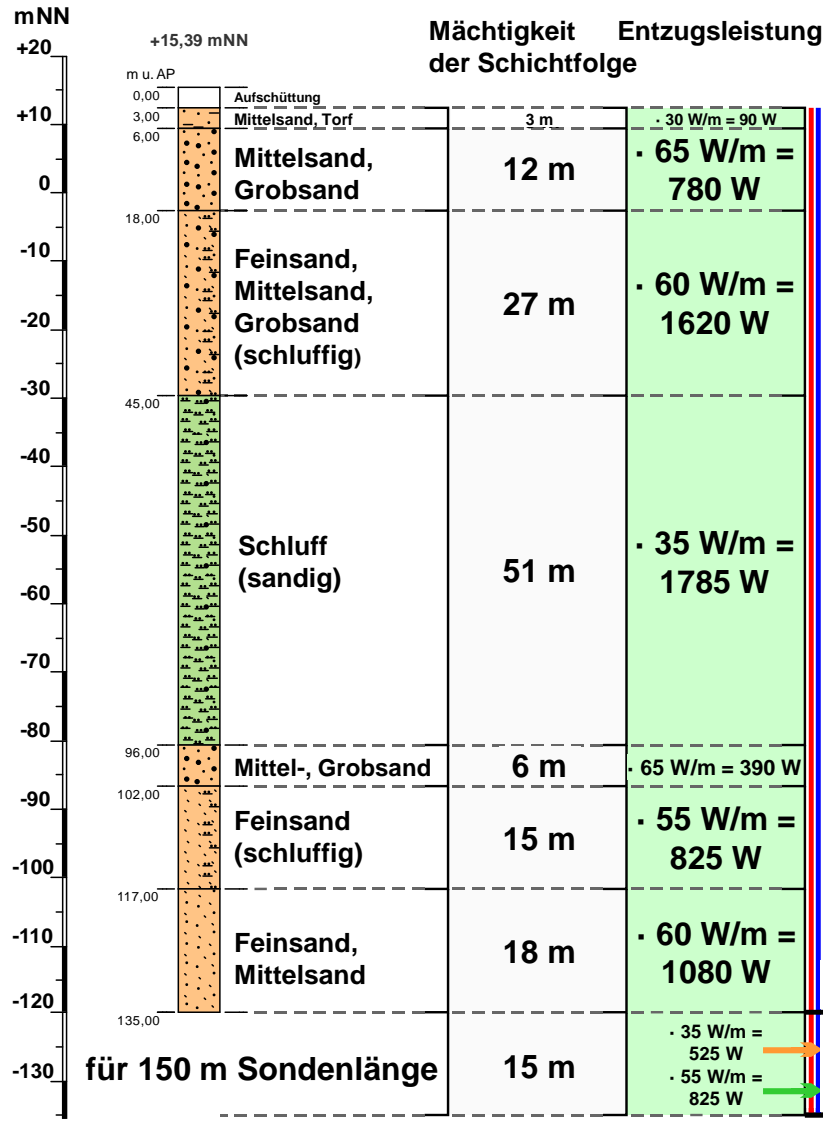
$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit in W/mK

Entzugsleistung für 1.800 Heizstunden/Jahr (h/a) - Einfamilienhaus





# Planung - Entzugsleistungsberechnung für kleinere geothermische Anlagen



Zusammenhang zwischen Wärmeentzugsleistung und Anzahl der Volllaststunden pro Jahr

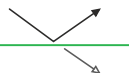
6570 W Leistungs-Berechnung für 130 m Sondenlänge

7095 W Prognose für Schluff bei 150 m Sondenlänge

7395 W Prognose für Sand bei 150 m Sondenlänge

2400 h/a

Entzugsleistung für eine Erdwärmesonde bei 2.400 h Volllastbetrieb (Anlagen bis ca. 30 kW Heizleistung)



# Planung – Berechnungen für größere geothermische Anlagen und Sondenfelder

Grundparameter - Thermische Untergrundeigenschaften		Einheit
• Mittlere Wärmeleitfähigkeit	2,0 – 2,4	W/(mK)
• Spez. mittlere Wärmekapazität	2,3 – 2,5	MJ/(m³K)
• Mittlere Erdreichtemperatur (Temperatur-Tiefenprofil-Messungen)	10,5 – 12,0	°C
• Wärmeleitfähigkeit des eingesetzten Verpressmaterial	2,0	W/(mK)

Empfohlene Grenztemperaturen (Verdampfer delta T = 3 K)		
• Min. Solemitteltemperatur, Grundlast	1,5	°C
• Max. Solemitteltemperatur, Grundlast	18,0	°C

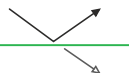
Erdsondenanlage	Variante	1	2	3	4	Einheit
		• Anordnung	6 x 25	4 x 25	6 x 25	
• Anzahl Erdsonden		150	100	150	150	Stk.
• Bohrtiefe Ø		130	200	200	200	m
• Gesamtbohrmeter		19500	20000	30000	30000	m
• Sondenabstand		10	10	<b>10</b>	<b>6</b>	m

Charakteristische Größen (ohne Bodenkennwerte!)						
• Spez. Entzugsarbeit		82,0	80,0	84,0	72	kWh/m/a

Spezifische Wärmekapazität: Energie pro (Kubikmeter/Masse · Temperatur)

**Berechnungen über das Programm EED (Earth-Energy-Designer 4.19)**



# Planung - Simulationsrechnungen für größere Erdwärme-Sondenfelder

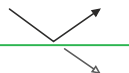
EWS-Feld Bezeichnung	Anzahl EWS / Sonden-Abstand	Sonden-länge	Gesamt-länge EWS	Wärme-leit-fähigkeit	Wärme-kapa-zität	Heiz-leis-tung	Betriebs-stunden (Heizen)	Kühl-leis-tung	Betriebs-stunden (Kühlen)	Heiz-arbeit	Kühl-arbeit
	[-]	[m]	[m]	W/(mK)	MJ/(m³K)	[kW]	[h/a]	[kW]	[h/a]	[MWh/a]	[MWh/a]
Variante 150/130-1A	150 / 10	130	19.500	2,2	2,5	514	3.500	500	2.000	1.799	1.000
Variante 150/130-1B	150 / 10	130	19.500	2,4	2,5	800	2.500	550	2.000	2.000	<u>1.100</u>
Variante 150/200-2A	150 / 10	200	30.000	2,2	2,5	743	3.500	650	2.000	2.601	1.300
Variante 100/200-2B	100 / 10	200	20.000	2,4	2,5	800	2.500	500	2.000	2.000	<u>1.000</u>
Variante 150/200-2C	150 / 10	200	30.000	2,0	2,3	800	3.500	975	2.000	2.800	<u>1.950</u>
Variante 150/200-2D	150 / 10	200	30.000	2,4	2,5	900	3.500	1.100	2.000	3.150	2.200
Variante 150/200-2E	150 / 6	200	30.000	2,0	2,3	771	3.500	1.000	2.000	2.699	<u>2.000</u>



# Planung – Berechnungen und Interpolationen zum Einfluss des Sonden-Abstandes

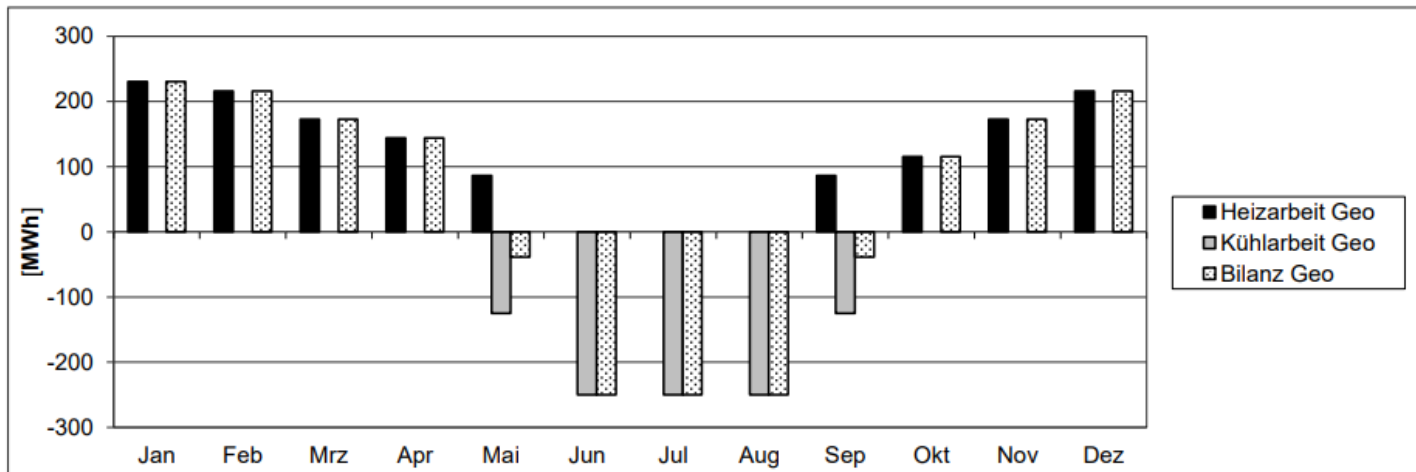
EWS-Feld / Bezeichnung	Anzahl EWS / Sonden- länge	Sonden- abstand	Gesamt- länge EWS	Heiz- Leistung	Betriebs- stunden (Heizen)	Kühl- leistung	Betriebs- stunden (Kühlen)	Jahres- heiz- arbeit	Jahres- kühl- arbeit	Spez. Entzugs- arbeit
	[m]	[m]	[m]	[kW]	[h/a]	[kW]	[h/a]	[MWh/a]	[MWh/a]	[kWh/m/a]
<b>Variante 150/200-2E</b>	150 / 200	6	30.000	771	3.500	1.000	2.000	2.699	2.000	69,3
Interpolierte Werte	150 / 200	7	30.000	778	3.500	994	2.000	2.724	1.988	70,7
	150 / 200	8	30.000	786	3.500	988	2.000	2.749	1.975	72,2
	150 / 200	9	30.000	793	3.500	981	2.000	2.775	1.963	73,6
<b>Variante 150/200-2C</b>	150 / 200	10	30.000	800	3.500	975	2.000	2.800	1.950	75,0

Wärmeleitfähigkeit: 2,0 W/m·K und Wärmekapazität: 2,3 MJ/m<sup>3</sup>·K

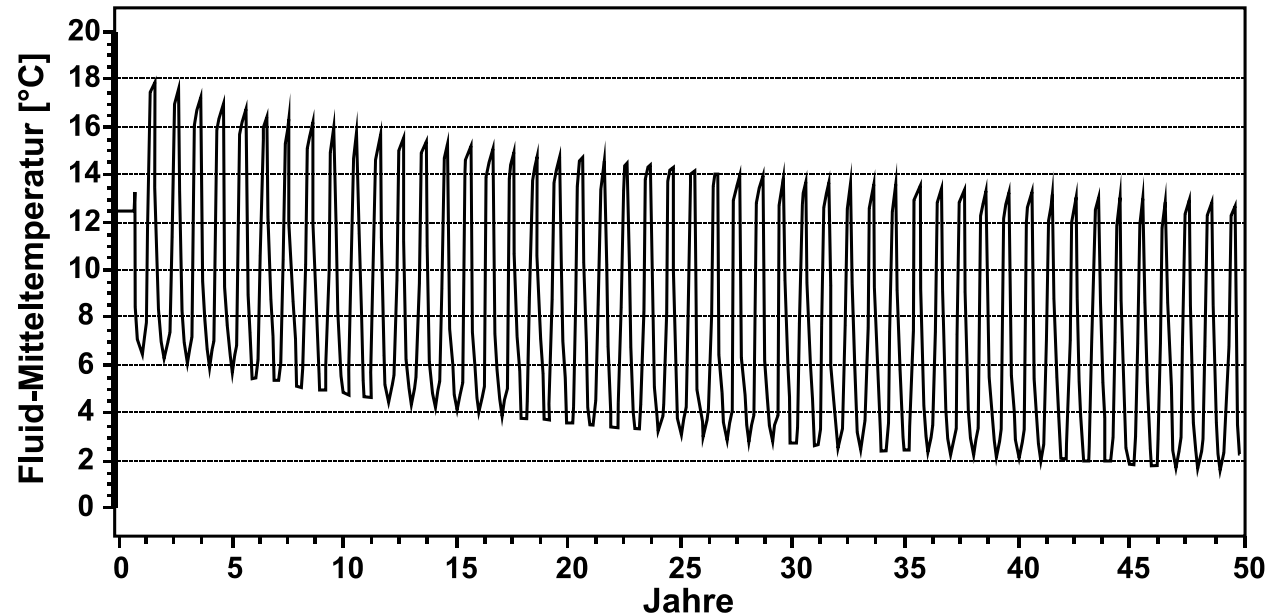


# Planung – Berechnung der Heizleistung für größere Anlagen (EED-Simulationen)

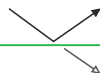
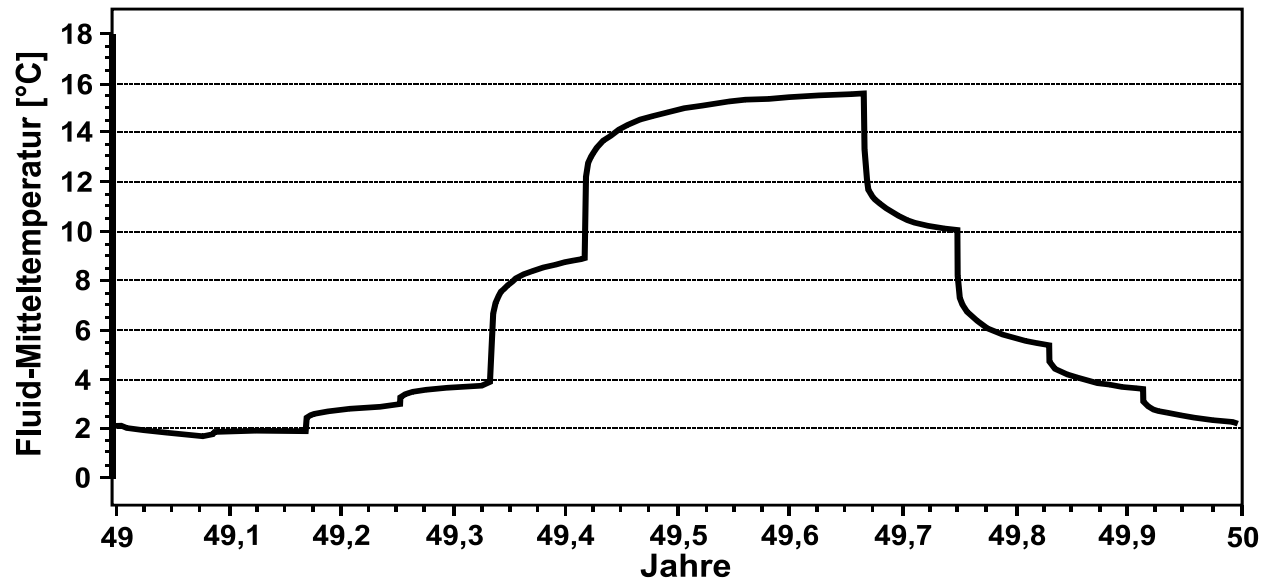
Anlagentechnik						
Heizbetrieb			Kühlbetrieb			Bilanz
Heizleistung WP	514 kW		Kühlleistung	500 kW		
Betriebsstunden	3500 h/a		Betriebsstunden	2000 h/a		
Jahresheizarbeit	1800 MWh/a		Jahreskühlarbeit	1000 MWh/a		
Betriebsweise	bivalent		Art der Kühlung	passiv		
Mittlere Leistungszahl	5,00		Mittlere Leistungszahl	∞		
	Verteilung %	Heizarbeit WP MWh	Heizarbeit Geo MWh	Verteilung %	Kühlarbeit Geo MWh	Arbeit Geo MWh
Jan	16,0%	288	230	0,0%	0	230
Feb	15,0%	270	216	0,0%	0	216
Mrz	12,0%	216	173	0,0%	0	173
Apr	10,0%	180	144	0,0%	0	144
Mai	6,0%	108	86	12,5%	-125	-39
Jun	0,0%	0	0	25,0%	-250	-250
Jul	0,0%	0	0	25,0%	-250	-250
Aug	0,0%	0	0	25,0%	-250	-250
Sep	6,0%	108	86	12,5%	-125	-39
Okt	8,0%	144	115	0,0%	0	115
Nov	12,0%	216	173	0,0%	0	173
Dez	15,0%	270	216	0,0%	0	216
<b>Summe</b>	<b>100%</b>	<b>1.800</b>	<b>1.440</b>	<b>100%</b>	<b>-1.000</b>	<b>440</b>



**Prognostizierte  
Temperatur-Verläufe über  
50 Jahre Betriebszeit  
(Nachweise für die  
Genehmigungsbehörden)**

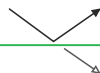
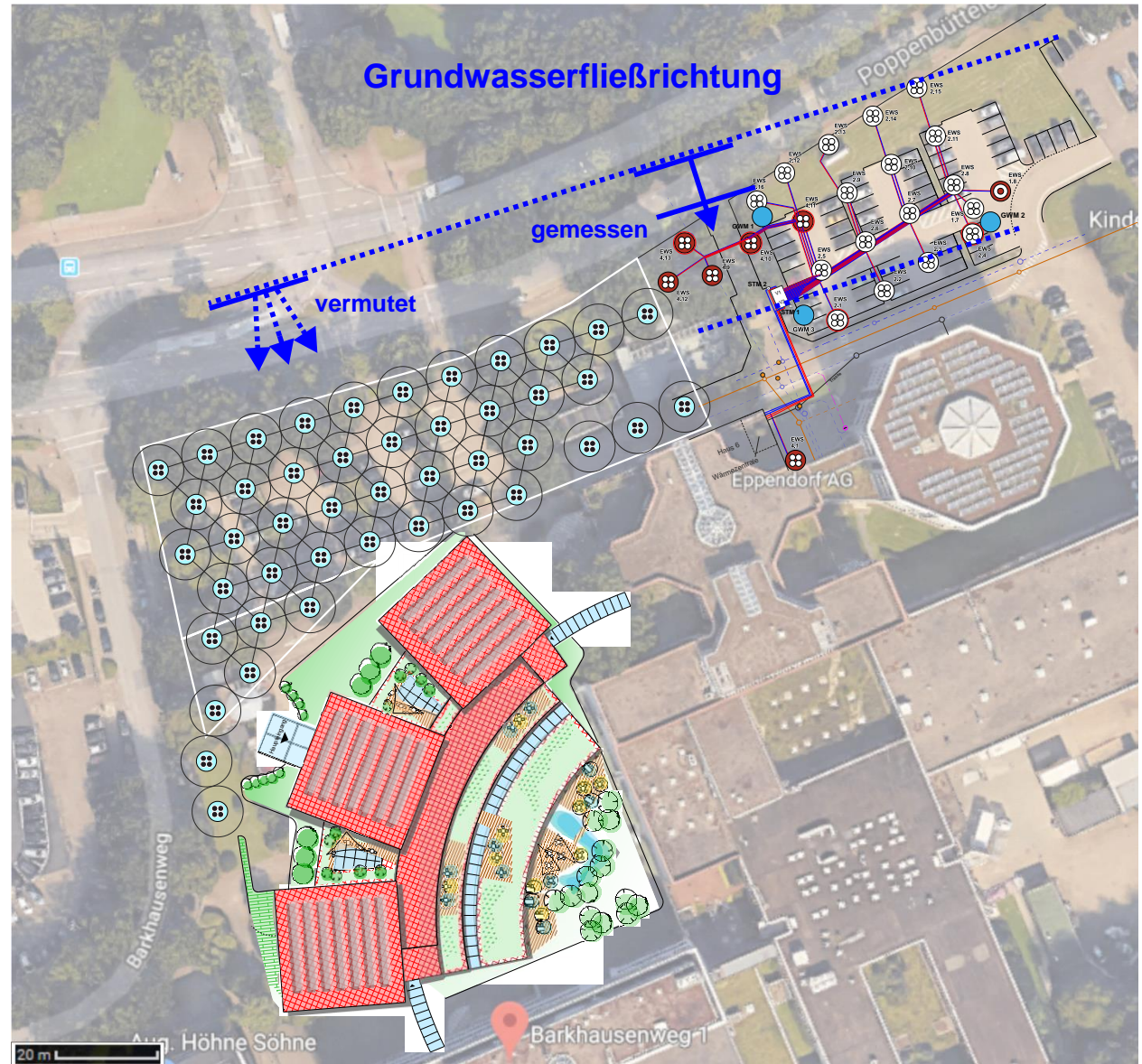


**Prognostizierter  
saisonaler Temperatur-  
Verlauf im 50. Jahr nach  
der Inbetriebnahme der  
Anlage**



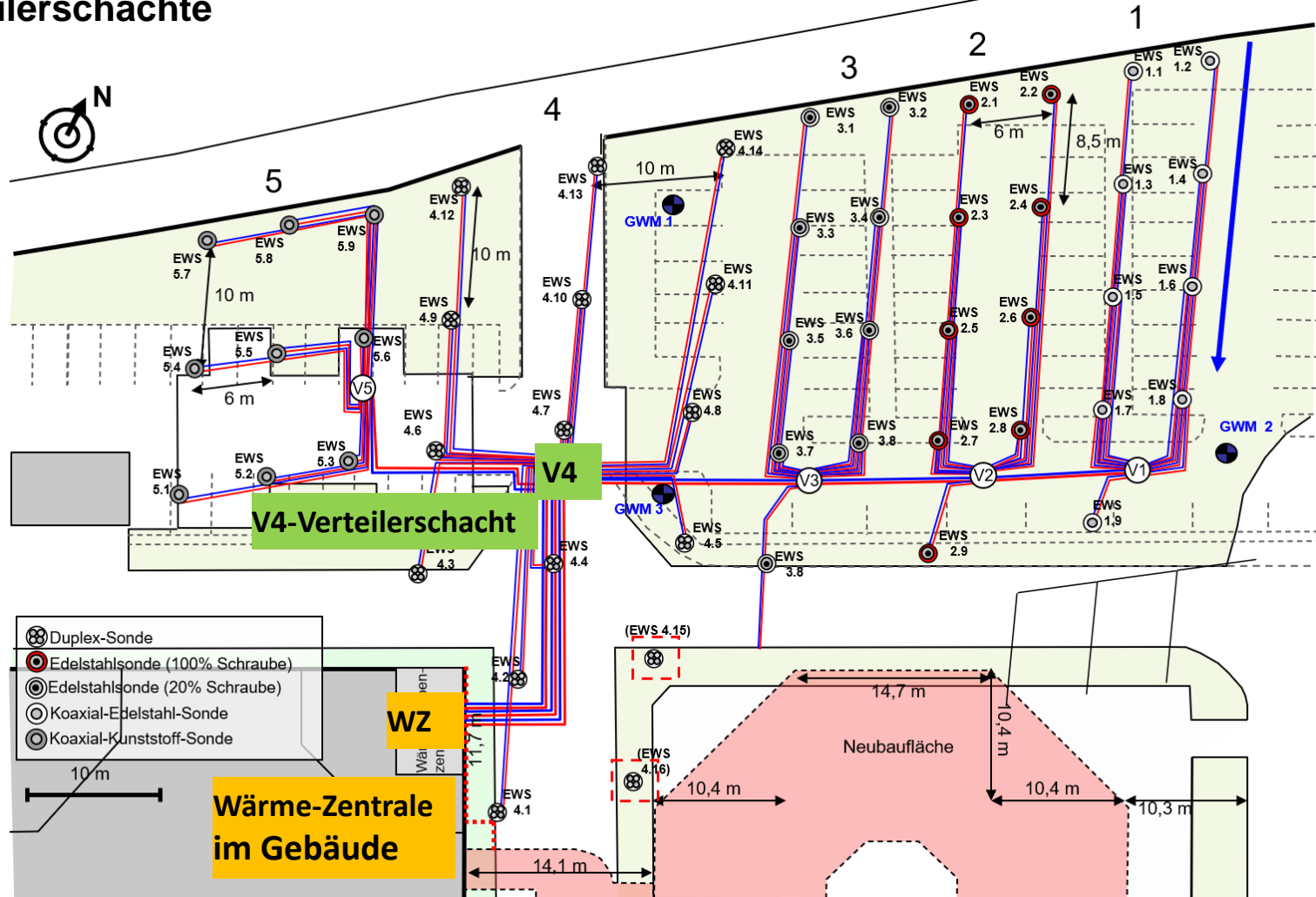
# Planung – Konzeption und Lage der Erdwärme-Sondenfelder

**Berechnung  
verschiedener  
Anordnungs-  
Möglichkeiten der  
Erdwärmesonden  
auf den nutzbaren  
Freiflächen  
hinsichtlich Lage,  
Sondenlänge und  
Sondenabstand.**



# Planung – Lage der Bohrungen und Anbindung der Erdwärmesonden

Festlegung der Bohrpunkte und Sonden sowie der Horizontalleitungen und Anbindung an die Sammel-Leitungen und die Verteilerschächte



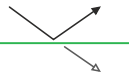
Ausführungsplanung: Lage der EWS-Felder und Anbindung vom Verteilerschacht an die Wärmezentrale im Gebäude



# Bau einer Anlage – Bohrungen für den Einbau Erdwärmesonden



**Bohrgeräte-Einsatz zur Anlage von EWS-Flach- und Tiefsonden-Feldern bis 185 m Tiefe.**



# Bau einer Anlage – Einbau der Erdwärmesonden



**Abrollen einer Duplex-Erdwärme-Sonde (schwarze Leitung) und dem Temperatur-Messrohr (blaue Leitung) von der Haspel sowie Einführung der Sonden in das Bohrloch.**



# Bau der Anlage – Herstellung der Horizontal-Leitungen für die EWS



**Aufgrabungen zur Verlegung der EWS-Horizontal-Leitungen bis ca. 1,5 m unter Geländeoberkante sowie Verfüllung der Gräben und lagenweise Verdichtung der Füllsande.**

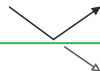
**Anschließend erfolgt die Zusammenführung sämtlicher EWS-Horizontal-Leitungen für die Anbindung an einen Verteilerschacht. Vom Verteilerschacht erfolgt die Zuführung über große Hauptleitungen (Vor- und Rücklauf) zur Wärmezentrale im Gebäude.**



# Bau einer Anlage – Lieferung und Einbau eines Verteilerschachtes



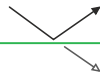
**Einbau eines Verteilerschachtes für die Aufnahme, Steuerung und Druck-Regelung von 24 Erdwärme-Sonden. Einbau erfolgte wegen möglichem Stauwasser-Auftrieb abgesichert unter Nutzung von groß ausgelegtem Geotextil und Verfüllung mit 1,2 m mächtigen Sand-Lagen.**



# Bau einer Anlage – Anbindung vom Verteilerschacht an die Wärmezentrale



Verlegung und Verschweißen der 150 mm großen Vor- und Rücklaufleitungen vom Verteilerschacht zur Wärmezentrale im Firmengebäude.



# Überwachung – Monitoring zur Grundwasserbeschaffenheit



**Freispülen der Messstellen sowie Bestimmungen von pH-Wert, Leitfähigkeit und Temperatur sowie Aufnahme von Temperatur-Tiefenprofilen**

**Halbjährliche Temperatur- und Leitfähigkeits-Messungen an den Grundwasser-Messstellen (linkes Bild) und den Temperatur-Sonden-Messrohren (rechtes Bild). Messrohre werden nach den Messungen wieder mit Wärmefluid (Glycol-Wasser Gemisch) aufgefüllt, um ein Einfrieren der Mess-Sonde unterhalb von 1 °C zu verhindern.**

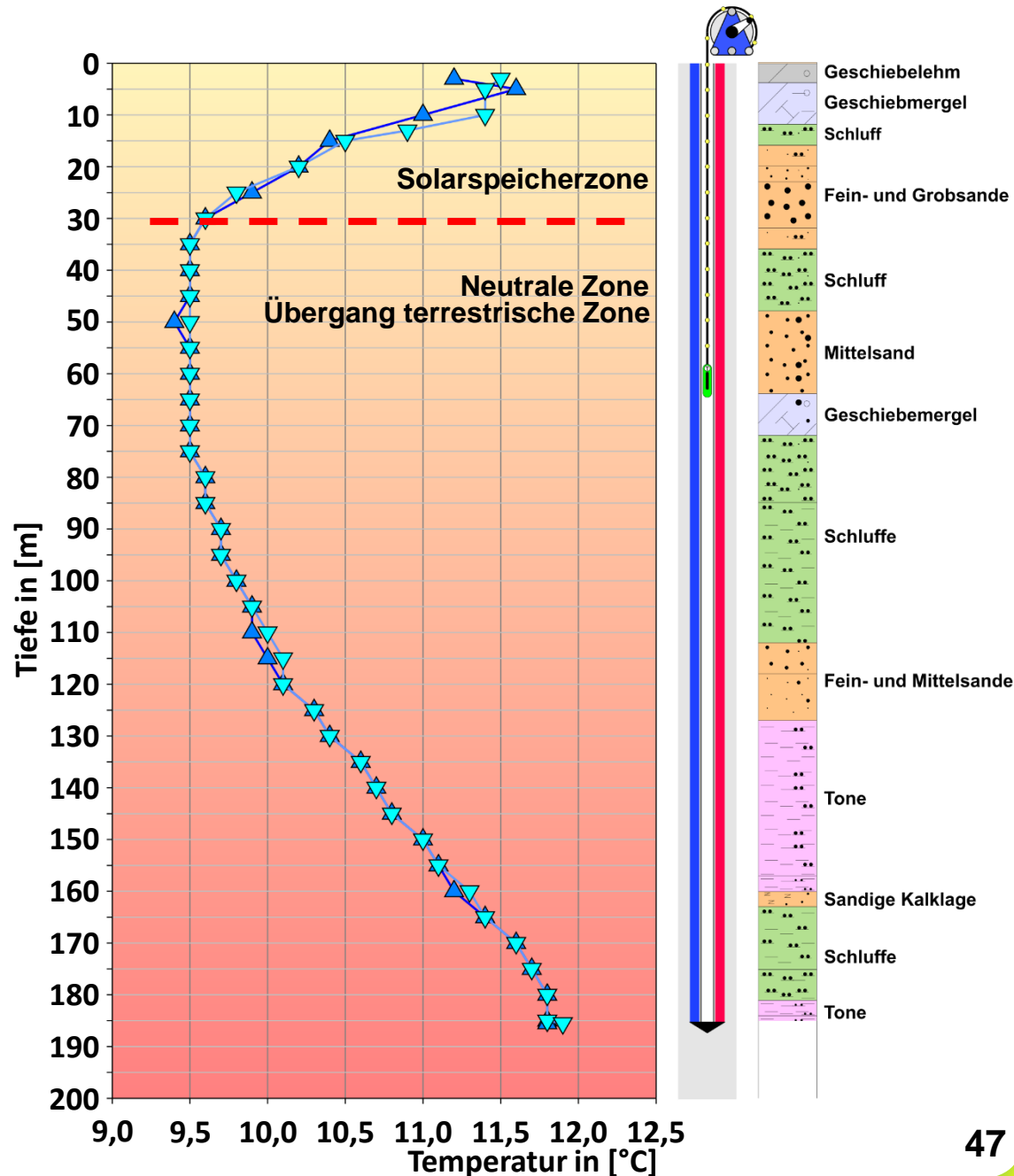


# Überwachung – Aufnahme von Temperatur-Tiefenprofilen

- Erdreich- bzw. Grundwassertemperatur im ungestörten Zustand sind abhängig von der Fließgeschwindigkeit
- Fließgeschwindigkeit ist abhängig von den Sedimenteigenschaften (z.B. Durchlässigkeitsbeiwerte) und dem hydraulischen Gradienten

**Aufnahme der Temperatur-Tiefenprofile** im ungestörten Erdreich (obere Bodenzone) sowie im Grundwasser-Horizont und in den tieferen, tonigen Sedimenten in einer Messstelle bis in 185 m Tiefe **vor der Inbetriebnahme der geothermischen Anlage**.

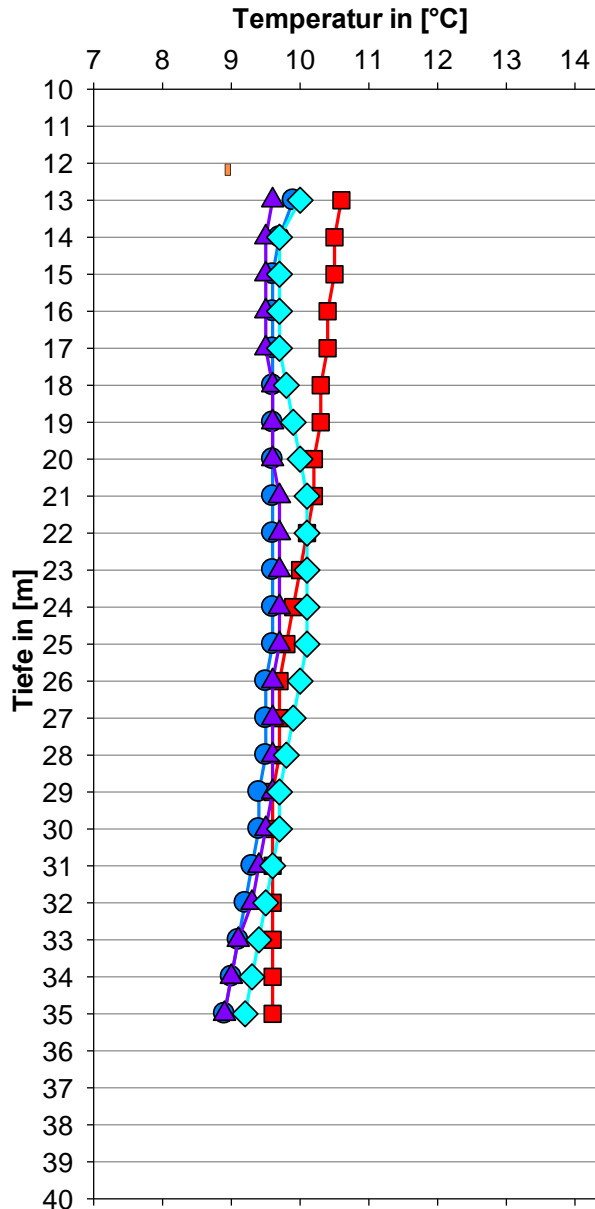
Die über die gesamte Sondenstrecke **gemittelte** Erdreichtemperatur beträgt hier ca. 10,3 °C.



# Überwachung – Zeitliche Temperatur-Entwicklung im Grundwasserleiter

- Halbjährliche Kontrolle der Temperatur-Entwicklung im Grundwasserleiter
- Ermittlung der Regenerationszeiten
- Überprüfung zum Einfluss der geothermischen auf die Grundwasserbeschaffenheit
- Dokumentation gegenüber den aufsichtführenden Genehmigungsbehörden

- Messung vor der Inbetriebnahme des Sondenfeldes
- 5 Tage nach Abschalten
- ▲ 1 Monat nach Abschalten
- ◆ 6 Monate nach Abschalten



Tiefe in m	Temperatur in °C			
	28. Aug. 2012	13. Mai 2022	10. Juni 2022	10. Nov. 2022
13	10,6	9,9	9,6	10
14	10,5	9,7	9,5	9,7
15	10,5	9,6	9,5	9,7
16	10,4	9,6	9,5	9,7
17	10,4	9,6	9,5	9,7
18	10,3	9,6	9,6	9,8
19	10,3	9,6	9,6	9,9
20	10,2	9,6	9,6	10
21	10,2	9,6	9,7	10,1
22	10,1	9,6	9,7	10,1
23	10	9,6	9,7	10,1
24	9,9	9,6	9,7	10,1
25	9,8	9,6	9,7	10,1
26	9,7	9,5	9,6	10
27	9,7	9,5	9,6	9,9
28	9,7	9,5	9,6	9,8
29	9,6	9,4	9,6	9,7
30	9,6	9,4	9,5	9,7
31	9,6	9,3	9,4	9,6
32	9,6	9,2	9,3	9,5
33	9,6	9,1	9,1	9,4
34	9,6	9	9	9,3
35	9,6	8,9	8,9	9,2





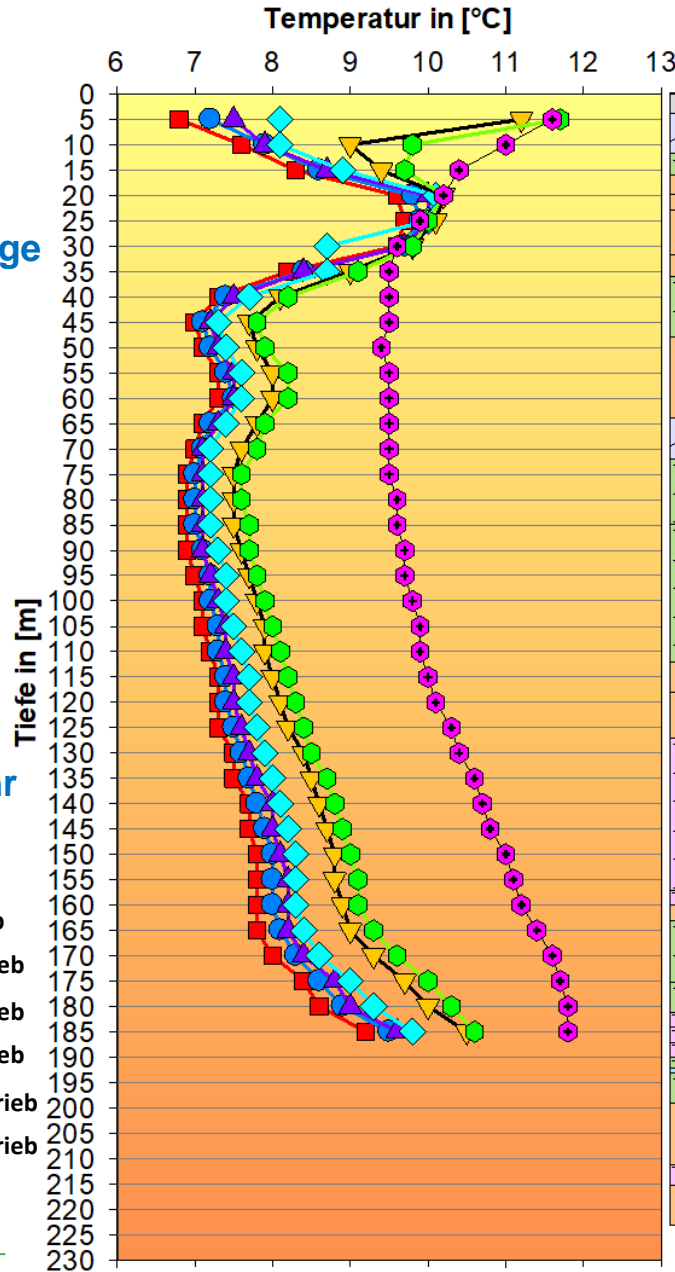
# Überwachung – Ermittlung der Regenerationszeiten im Untergrund

**Grundwasser:**  
Regenerationszeit: 30 Tage

**Entwicklung der Temperatur-Tiefenprofile zur Erfassung der Regenerationszeiten für das Grundwasser und den Tonkörper**

**Ton-/Schluff-Schichten:**  
Regenerationszeit: > 1 Jahr

- ⊕ TMS 28.11.2012 – Startwert vor Inbetriebnahme
- TMS 13.05.2022 – 5 Tagen außer Betrieb
- TMS 20.05.2022 – 12 Tagen außer Betrieb
- ▲ TMS 27.05.2022 – 19 Tagen außer Betrieb
- ◆ TMS 10.06.2022 – 33 Tagen außer Betrieb
- ▼ TMS 07.09.2022 – 122 Tagen außer Betrieb
- TMS 10.11.2022 – 186 Tagen außer Betrieb

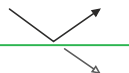


Tiefe in m	TMS 4.10	TMS 4.10	TMS 4.10	TMS 4.10	TMS 4.10	TMS 4.10
	Messung 13.05.22	Messung 20.05.22	Messung 27.05.22	Messung 10.06.22	Messung 07.09.22	Messung 10.11.22
5	6,8	7,2	7,5	8,1	11,2	11,7
10	7,6	7,9	7,9	8,1	9	9,8
15	8,3	8,6	8,7	8,9	9,4	9,7
20	9,6	9,8	10	10,1	10,2	10,2
25	9,7	9,9	10	10	10,1	10
30	9,6	9,7	9,7	8,7	9,8	9,8
35	8,2	8,4	8,4	8,7	9	9,1
40	7,3	7,4	7,5	7,7	8,1	8,2
45	7	7,1	7,2	7,3	7,7	7,8
50	7,1	7,2	7,3	7,4	7,8	7,9
55	7,3	7,4	7,5	7,6	8	8,2
60	7,3	7,5	7,5	7,6	8	8,2
65	7,1	7,2	7,3	7,4	7,8	7,9
70	7	7,1	7,1	7,2	7,6	7,8
75	6,9	7	7,1	7,2	7,5	7,6
80	6,9	7	7,1	7,2	7,5	7,6
85	6,9	7	7,1	7,2	7,5	7,7
90	6,9	7,1	7,1	7,3	7,6	7,7
95	7	7,2	7,2	7,4	7,7	7,8
100	7,1	7,2	7,3	7,4	7,8	7,9
105	7,1	7,3	7,4	7,5	7,9	8
110	7,2	7,3	7,4	7,6	7,9	8,1
115	7,3	7,4	7,5	7,7	8	8,2
120	7,3	7,4	7,5	7,7	8,1	8,3
125	7,3	7,5	7,6	7,8	8,2	8,4
130	7,5	7,6	7,7	7,9	8,4	8,5
135	7,5	7,7	7,8	8	8,5	8,7
140	7,7	7,8	8	8,1	8,6	8,8
145	7,7	7,9	8	8,2	8,7	8,9
150	7,8	8	8,1	8,3	8,8	9
155	7,8	8	8,2	8,3	8,8	9,1
160	7,8	8	8,2	8,3	8,9	9,1
165	7,8	8,1	8,2	8,4	9	9,3
170	8	8,3	8,4	8,6	9,3	9,6
175	8,4	8,6	8,8	9	9,7	10
180	8,6	8,9	9	9,3	10	10,3
185	9,2	9,5	9,6	9,8	10,5	10,6

\*gekürzter Datensatz – Auflistung ab 5 m GOK

# Überwachung – Änderung der Grundwasserstände (Flurabstand)

Grundwassergleichenverlauf 2008 (laut Karte interpoliert) sowie von 2013 bis 2022 (gemessen)



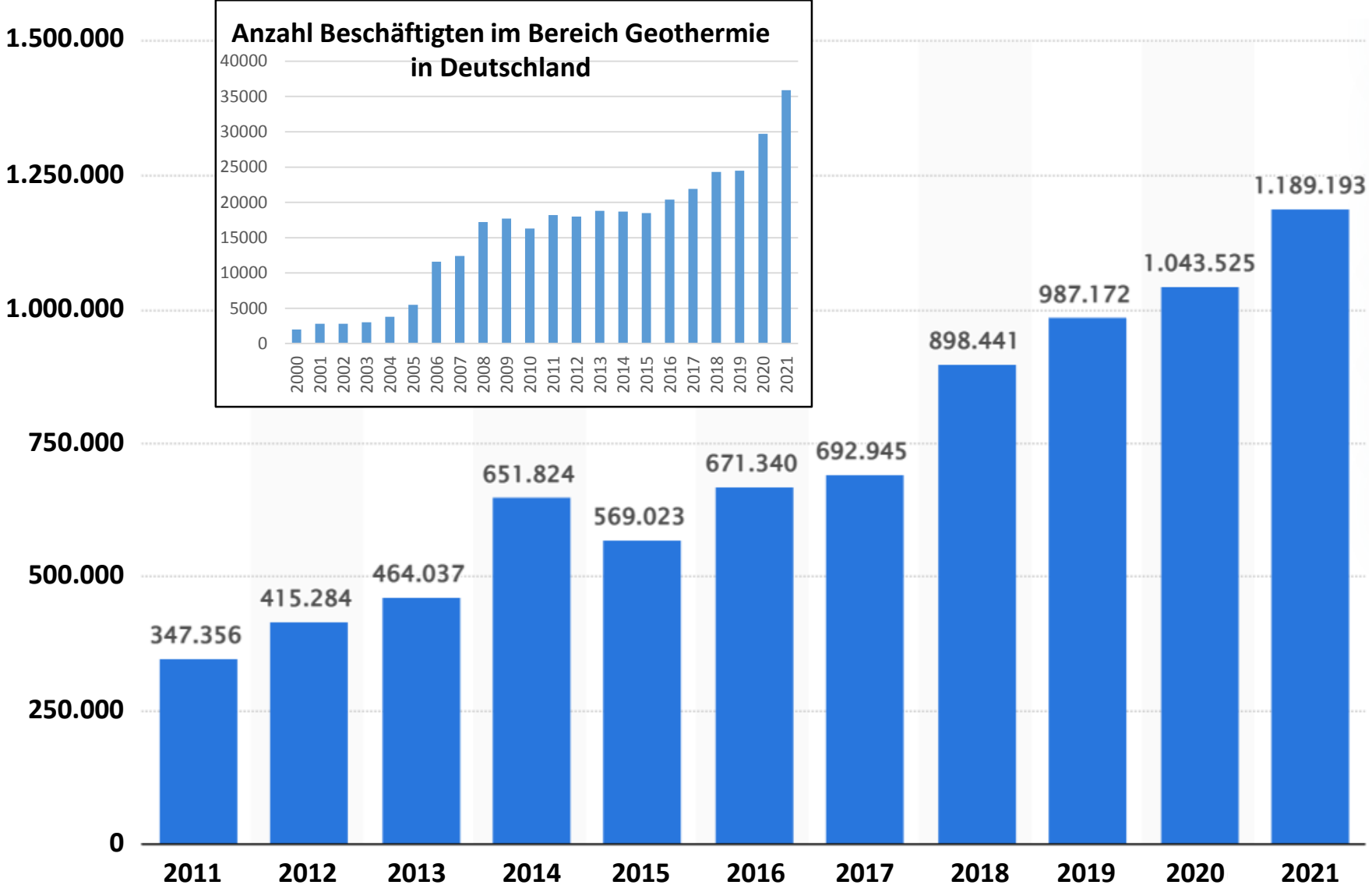
# Kosten – „Kostenschätzung (!)“ zur Erstellung einer geothermischen Anlage

Leistungen	Kosten
<b>Industrie-Anlagen (500 bis 800 kW-Anlage):</b>	
Bohrkosten inkl. Horizontal-Anbindungen der EWS (ca. € 100.-/Bohrmeter bis 150 m Tiefe) (ca. € 120.-/Bohrmeter über 150 m Tiefe)	20.000 Bohrmeter bis 150 m: 2.000.000.- €
	20.000 Bohrmeter über 150 m: 2.400.000.- €
Probebohrung (bis 150 m Tiefe)	20.000.- €
Thermal Response Test (TRT)	3.800.- €
Temperatur-Überwachung im Untergrund der Sondenfelder (je nach Größe der Anlage!)	2.000 – 4.500.- €/Jahr
Wärmepumpen kaskadiert (500 bis 800 kW)	ca. 350.000.- €
Grundzubehör inkl. Inbetriebnahmekosten	ca. 90.000.- €
Gebäudeleittechnik/Schaltschrankbau	ca. 150.000.- €
Bau einer Wärmezentrale / Montagekosten	ca. 220.000.- €
<b>Ein- bis Zweifamilienhaus (ca. 15 KW):</b>	
Bohrkosten inkl. Horizontal-Anbindungen der EWS € 60.- /Bohrmeter (ca. 200 Bohrmeter)	ca. 12.000.- €
Wärmepumpe (WP), Pufferspeicher, Regelung	ca. 8.000.- €
<b>Verbrauchskosten (pro Jahr):</b>	
WP-Stromkosten: 12.000 kWh / 4 (JAZ für Sole-Anlage) x Strompreis ca. 0,30 €	ca. 900.- €



# Ausblick – Entwicklung der Geothermie in Deutschland

Wärmeabgabe in Megawattstunden



**Entwicklung der Wärmeabgabe durch geothermische Anlagen**

Quelle: Statista (Stand 2023)