
Bericht Nr. 1323082.1

Amt für Umwelt, Zug

Kanton Zug, Thermische Nutzung des Grundwassers

**Abschätzung des Wärmenutzungspotenzials des
Tiefengrundwasservorkommens Baar/Zug/Steinhausen**

2. September 2024

Autor(en)	Bearbeitete Themen
Dr. Emanuel Huber	Gesamter Bericht
Supervision	Visierte Inhalte
Dr. Vincent Badoux	Gesamter Bericht
Hinweise	

GEOTEST AG

Dr. Emanuel Huber

Dr. Vincent Badoux

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	4
1.1	Projekt	4
1.2	Aufgabenstellung	4
1.3	Verwendete Unterlagen	4
1.4	Durchgeführte Untersuchungen	5
2.	Hydrogeologie des Tiefengrundwasservorkommens	5
3.	Methodik.....	6
3.1	Vorgehensweise.....	6
3.2	Untersuchungsperimeter.....	6
3.3	Eigenschaften des Tiefengrundwasservorkommens	7
3.4	Doubletten-Systeme und Energielastprofile.....	8
3.5	Räumliche Klassifizierung	8
3.6	Numerische Simulationen	12
3.7	Auswertung	14
3.7.1	Festlegung der Einflusszonen.....	14
3.7.2	Temperaturänderung in 100 m Abstrom	14
3.7.3	Effizienz der Wärmerückgewinnung.....	14
3.7.4	Ermittlung des Wärmenutzungspotenzial mit einem Packing-Algorithmus	17
4.	Untersuchungsergebnisse	19
4.1	Numerische Simulation	19
4.2	Packing Algorithmus	21
4.3	Wärmenutzungspotenzial.....	21
5.	Schlussfolgerung.....	22

1. Einleitung

1.1 Projekt

Im Bereich des Baarerbeckens (Ebene von Baar/Zug) liegt in einer Tiefe von 80 m bis 130 m ein Grundwasserleiter, der sich über eine Fläche von ca. 10 km² erstreckt und von gering durchlässigen Seeablagerungen bedeckt ist. Das artesisch gespannte Tiefengrundwasser weist geringe Grundwasserfliessgeschwindigkeiten resp. -gradienten und eine relativ konstante Temperatur auf, was günstige Voraussetzungen für saisonale Wärmespeicherungen sind. Kenntnisse über den Untergrund sowie über die Nutzungsmöglichkeiten sind bisher erst vereinzelt vorhanden. Für die weitere Nutzung und die Entwicklung von Wärmespeicheranlagen wurden bereits in einem ersten Schritt im Auftrag des Amtes für Umwelt des Kantons Zug (AFU) der geologische Aufbau und die Wasserverhältnisse untersucht [9]. Als nächster Schritt soll auf Basis dieser Grundlagen das energetische Nutzungspotential abgeklärt werden.

Die GEOTEST AG wurde vom Amt für Umwelt des Kantons Zug (AFU, Herr Volker Lützenkirchen) beauftragt, das Potenzial der Wärmenutzung im Tiefengrundwasser "Baar/Zug/Steinhausen", folgend kurz "Tiefengrundwasser" zu ermitteln und dazu einen Geodatensatz zu bearbeiten.

1.2 Aufgabenstellung

Das jährliche Wärmenutzungspotenzial des Tiefengrundwasservorkommens soll ermittelt werden. Dabei sollen offene Grundwassernutzungen (Doubletten) sowie saisonale Aquiferspeicher (ATES) bei unausgeglichene und ausgeglichenen Energielastprofilen betrachtet werden. Es ist zudem abzuklären, wie die Ergebnisse generalisiert und auf ähnliche Grundwasservorkommen übertragen werden können.

1.3 Verwendete Unterlagen

Rechtliche Grundlagen

- [1] Gewässerschutzverordnung (GSchV), 28.10.1998
- [2] Bundesamt für Umwelt BAFU, Wärmenutzung aus Boden und Untergrund. Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmenutzung, 2009.
- [3] Amt für Wasser und Abfall AWA, Richtlinie Wärmepumpenanlagen, 05.2022.
- [4] Grundwasserwärmenutzung. SIA 384/7, 2015.

Allgemeine Grundlagen

- [5] Christian Dietrich Schönwiese, 2013, Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, Schweizerbart Science Publishers, ISBN: 9783443010690
- [6] IG Zyklus, Saisonale Wärmespeicherung im Grundwasser, 14.09.2022. [Link](#).
- [7] DHI, 2024, FEFLOW 8.1 (Finite Element Modeling Software of Flow, Mass and Heat Transport in Porous Media), a MIKE Powered by DHI software.

Angaben zum Projekt

- [8] Dr. Heinrich Jäckli AG, Bericht-Nr. 151277, Multi Energy Hub Technologiecluster Zug, Thermische Nutzung des Tiefengrundwassers – Hydrogeologischer Bericht zum Konzessionsgesuch, 13.07.2018.
- [9] pegeol AG, Bericht-Nr. PG0258.600, Potenzialstudie Tiefengrundwasser Kanton Zug (Teil 1), inkl. Geodaten (Mächtigkeit, Transmissivität, Durchlässigkeit, Druckniveau, Grundwasserspiegel) 09.10.2023.
- [10] AFU, 2023, Excel-Tabelle der Daten aus verfügbaren Bohrungen, E-Mail, 24.10.2023.
- [11] AFU, 2024, Abgrenzung Modellperimeter Tiefengrundwasservorkommen Baar-Zug-Steinhausen, GeoPackage, E-Mail von Volker Lützenkirchen, 14.05.2024
- [12] AFU, 2024, Excel-Tabelle mit den bestehenden thermischen Grundwassernutzungen im Tiefengrundwasser Baar/Zug/Steinhausen (17.5.2024) inkl. Koordinaten, E-Mail, 17.05.2024

1.4 Durchgeführte Untersuchungen

- Unterlagenstudium, Datenvorbereitungen
- Startsitung mit dem Amt für Umwelt zur Festlegung der Rahmenbedingungen
- Erarbeitung Lösungsansatz zu Ermittlung der Wärmenutzungspotenziale für offene Grundwassernutzungen (Doubletten) und saisonale Aquiferspeicherung (ATES) mit unausgeglichene und ausgeglichenen Energielastprofilen
- Besprechungen mit dem Amt für Umwelt zur Festlegung des Lösungsansatzes, Diskussion der Zwischenergebnisse
- Berechnung der verschiedenen Wärmenutzungspotenziale
- Dokumentation der Methodik, der Berechnungen und der Ergebnisse in einem Bericht, inkl. Vorschlag für weitere Untersuchungen
- Erstellen von Geodatensätzen für die berechneten Wärmenutzungspotenziale

2. Hydrogeologie des Tiefengrundwasservorkommens

Das Tiefengrundwasservorkommen des Baarerbeckens liegt in quartären Lockergesteinen, welche in einer 200 m tiefen Felsrinne abgelagert wurden. In einer Tiefe von einigen Zehnermetern liegen glazio-fluviale Ablagerungen, welche als Grundwasserleiter fungieren. Das Grundwasser ist grösstenteils gespannt oder artesisch [9]. Eine detaillierte hydrogeologische Beschreibung des Baarerbeckens kann in der Potenzialstudie Tiefengrundwasser Kanton Zug (Teil 1) entnommen werden [9].

3. Methodik

3.1 Vorgehensweise

In der vorliegenden Studie wird das Wärmenutzungspotenzial im Sinne der Leistung (in MW) oder der spezifischen Leistung (W/m^2) definiert. Gemäss dem Auftrag wird das Wärmenutzungspotenzial mit Berücksichtigung der Wärme- und Kältegewinnung und der saisonaler Wärmespeicherung ermittelt.

Um das Grundwasserwärmenutzungspotenzial des Tiefengrundwassers abzuschätzen, wird die maximale Anzahl an Grundwasserwärmenutzungen ermittelt, die innerhalb eines Untersuchungsperimeters erstellt werden können, ohne eine signifikante gegenseitige Beeinflussung (thermischen Kurzschlüsse mit Kaskadeneffekt) und ohne gegen die gesetzlichen Vorschriften zu verstossen. Es werden nur Doubletten-System berücksichtigt.

Dabei wird angenommen, dass keine Einschränkungen für das Erstellen der Nutzungen bestehen (die bestehende Infrastruktur, Nutzungseinschränkungen, usw. werden nicht berücksichtigt).

Das ermittelte Grundwasserwärmenutzungspotenzial entspricht daher dem maximalen technischen Grundwasserwärmenutzungspotenzial, das erreicht werden kann. Dieses ist einerseits durch die hydrogeologischen Eigenschaften des Grundwasservorkommens bestimmt, wie z.B. die Mächtigkeit, die hydraulische Durchlässigkeit, der hydraulische Gradient und der Flurabstand. Andererseits ist das Potenzial durch die Brunnenanordnung und die Energielastprofile beeinflusst.

Das Potential wird anhand numerischer Modellrechnungen bzw. Simulationen ermittelt.

Um die Rechenzeit stark zu reduzieren, wird das Tiefengrundwasser in repräsentative Einheiten (Cluster) klassifiziert. Für jede dieser Einheiten werden die drei Nutzungsarten mit ausgeglichen und unausgeglichene Energielastprofil einzeln simuliert.

Anschliessend werden die Nutzungen gemäss ihrer thermischen und hydraulischen Einflusszonen mit einem Packing Algorithmus innerhalb des Untersuchungsperimeter platziert.

Die Auswertung erfolgt anhand der Beurteilung der Änderung der Grundwassertemperatur in 100 m Abstrom sowie der Effizienz der Wärmerückgewinnung.

Alle einzelnen Schritte werden in den kommenden Abschnitten näher beschrieben.

3.2 Untersuchungsperimeter

Der Untersuchungsperimeter wurde vom AFU festgelegt [11]. Der Perimeter entspricht grundsätzlich der Ausdehnung des Tiefengrundwasservorkommens. Die Randgebiete sowie die seitlich anschliessenden Vorkommen in den Felsrinnen wurden u.a. aufgrund der schlechte Datengrundlage und höheren hydraulischen Gradienten aus dem Untersuchungsperimeter ausgeschlossen. Die Fläche des Untersuchungsperimeters beträgt 11 ha und ist in der Abbildung 1 dargestellt.

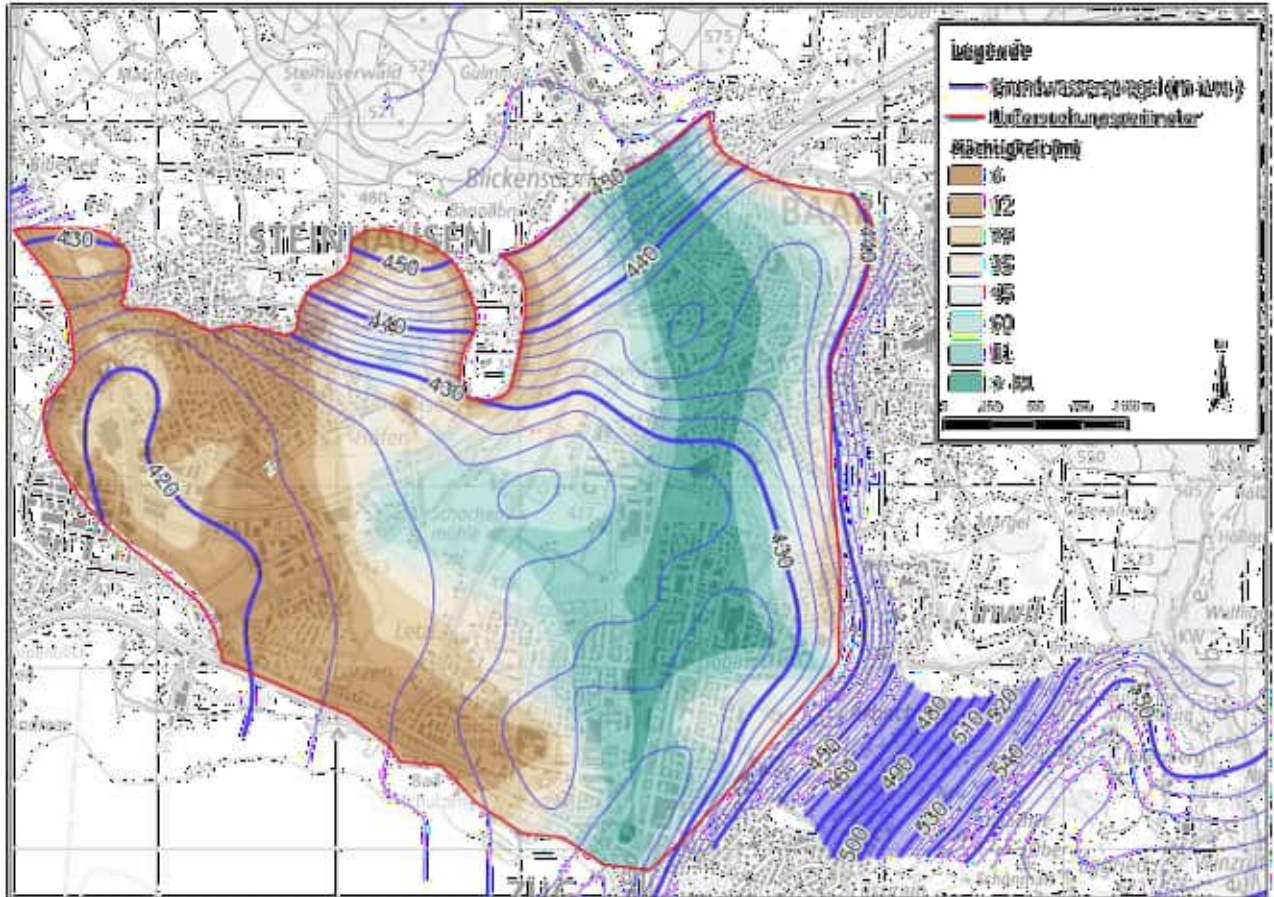


Abbildung 1 Mächtigkeit des tiefen Grundwasservorkommens mit Untersuchungsperimeter.

3.3 Eigenschaften des Tiefengrundwasservorkommens

Im Rahmen der Potenzialstudie Tiefengrundwasser Kanton Zug (Teil 1) [9] wurden die Mächtigkeit und die Durchlässigkeit des Tiefengrundwasservorkommens anhand von Bohrungen interpoliert. Diese interpolierten Datensätze liegen der GEOTEST AG vor. Diese wurden für die vorliegende Potenzialstudie übernommen.

Der Grundwassergradient wurde anhand der Grundwasserspiegel-Isohypsen im Untersuchungsperimeter ermittelt. Diese wurden vom AfU zur Verfügung gestellt [11].

Die Verteilung des Flurabstandes, der hydraulischen Durchlässigkeit, des hydraulischen Gradienten und der Mächtigkeit des Tiefengrundwasservorkommens innerhalb des Untersuchungsperimeter ist mittels Histogrammen in der Abbildung 2 dargestellt. Die räumliche Verteilung der einzelnen Eigenschaften ist Anhang 1 zu entnehmen.

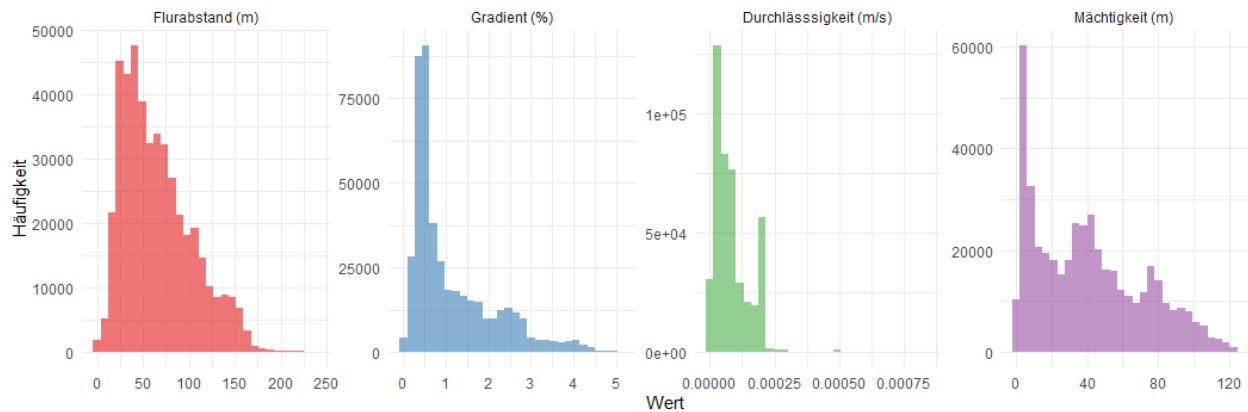


Abbildung 2 Verteilung des Flurabstandes, des hydraulischen Gradienten, der hydraulischen Durchlässigkeit und der Mächtigkeit des Tiefengrundwasservorkommens innerhalb vom Untersuchungsperimeter.

3.4 Doubletten-Systeme und Energielastprofile

Zwecks Vereinfachung werden nur Doubletten-Systeme simuliert. Die Eigenschaften können wie folgt zusammengefasst:

- 2 Brunnen pro Doubletten-Systeme, die bidirektional oder rezirkulativ betrieben werden können
- 100 m Abstand zwischen den Brunnen, was in der Regel als ausreichend erachtet wird, um thermischen Kurzschlüsse zu vermeiden [8].
- die Brunnen liegen auf der gleichen Grundwasserstromlinie

Das Wärmenutzungspotenzial wird für unterschiedlichen Nutzungen mit ausgeglichenen und unausgeglichene Energielastprofile berechnet. Folgende Nutzungen wurden berücksichtigt:

- Gebäudetyp 1: Mehrfamilienhaus mit einer Heizleistung von 60 kW
- Gebäudetyp 2: Gewerbe- und Verwaltungsbau mit einer Heizleistung von 250 kW
- Gebäudetyp 3: Bürobau mit einer Heizleistung von 750 kW

Diese Nutzungen inkl. ihrer Energielastprofile (siehe Anhang 1) wurden aus der Zyklus-Studie zur saisonalen Wärmespeicherung im Grundwasser entnommen [6].

3.5 Räumliche Klassifizierung

Die räumliche Klassifizierung des Tiefengrundwassers basiert auf folgenden Parametern: (1) der hydraulischen Durchlässigkeit des Grundwasserleiters, (2) der Grundwassermächtigkeit und (3) des hydraulischen Gradienten.

Das Tiefengrundwasser wurde innerhalb des Untersuchungsperimeters mit dem k-Means Clustering Algorithmus [5] in Clusters unterteilt, welcher gleichzeitig alle drei Parametern berücksichtigt. Es wurden mehrere mögliche Anzahlen an Cluster getestet. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Gebiete mit 5 Cluster gut zusammenhängen und die Cluster auf eine höhere Repräsentativität des Grundwasservorkommens hinweisen. Die Ergebnisse des Clusterings in 5 Cluster ist in der Abbildung 3 dargestellt. Die Verteilung der drei Parametern innerhalb jedes Clusters ist in Abbildung 4 dargestellt.

Das Ergebnis des k-Means-Algorithmus besteht aus einzelnen Clustern, die räumlich zerteilt sind. Diese Zerteilung resultiert teilweise in kleine und ungünstige Polygone, die für die weiteren Berechnungen ungeeignet sind. Deshalb wurden einige Polygon zu anderen Clustern zugeteilt, um ein homogeneres Bild zu erhalten. Das Ergebnis dieser Handanpassung ist in Abbildung 5 dargestellt. Die entsprechenden Parameterverteilungen sind in Abbildung 6 dargestellt.

Pro angepasstes Cluster wurde der Medianwert der einzelnen Parameter als repräsentative Wert angenommen und für die thermischen numerischen Simulationen benutzt (Tabelle 1).

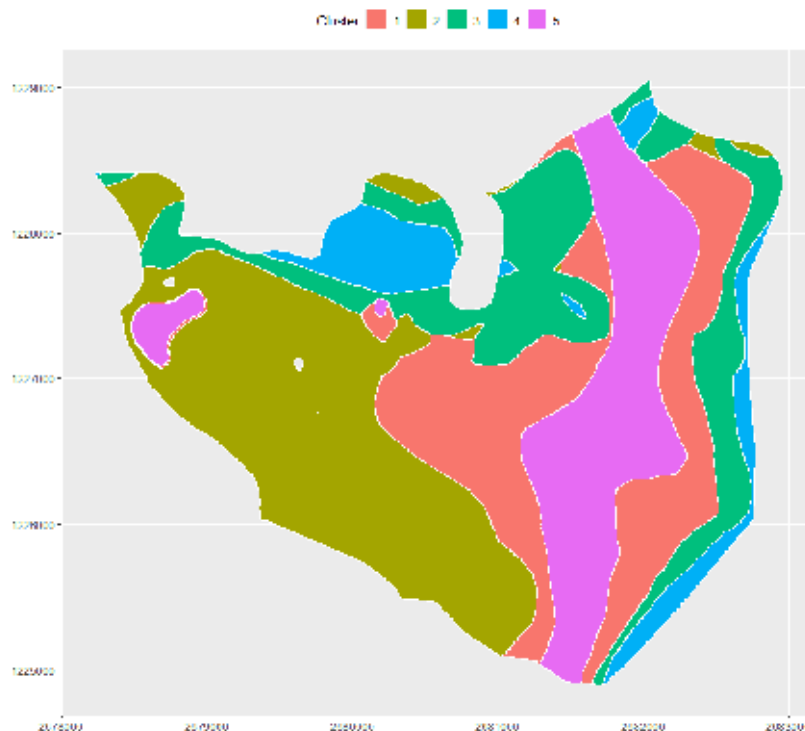


Abbildung 3 Ergebnisse der Klassifizierung anhand des k-Means Clustering Algorithmus.

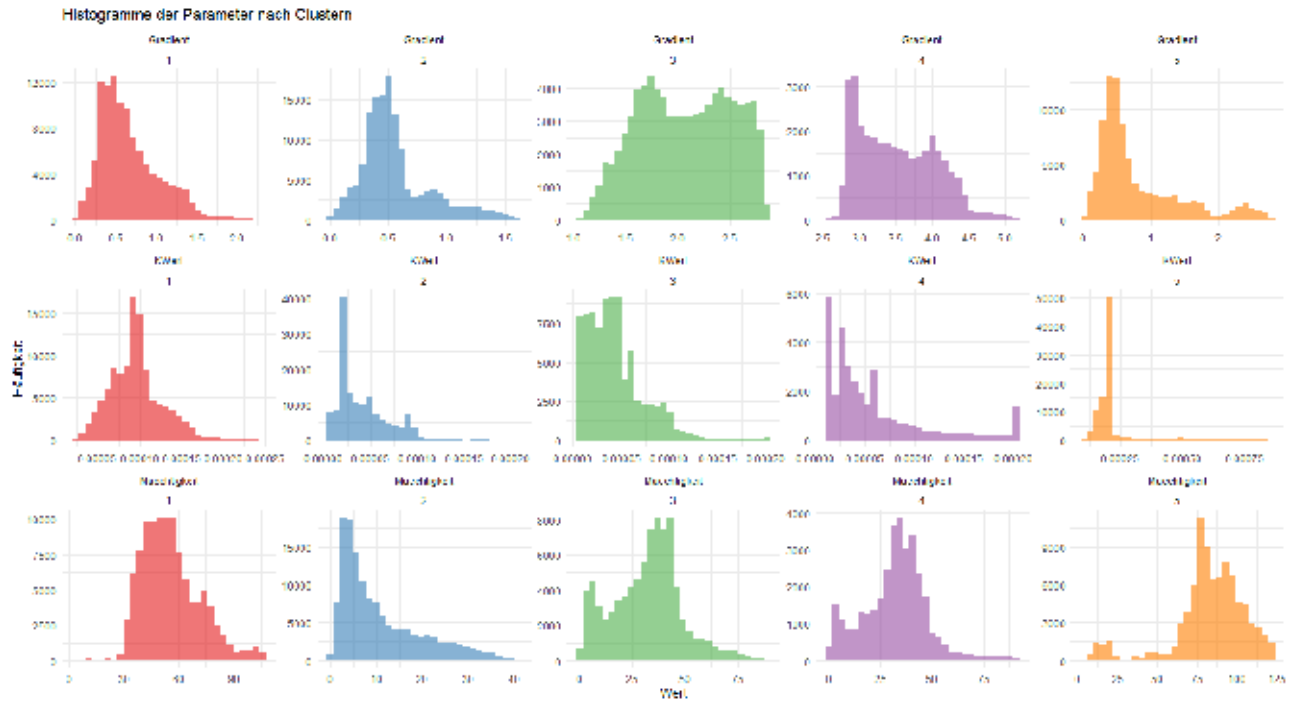


Abbildung 4 Verteilung der Parameter Gradient (%), Durchlässigkeit (m/s) und Mächtigkeit (m) für jedes Cluster von Abbildung 3.

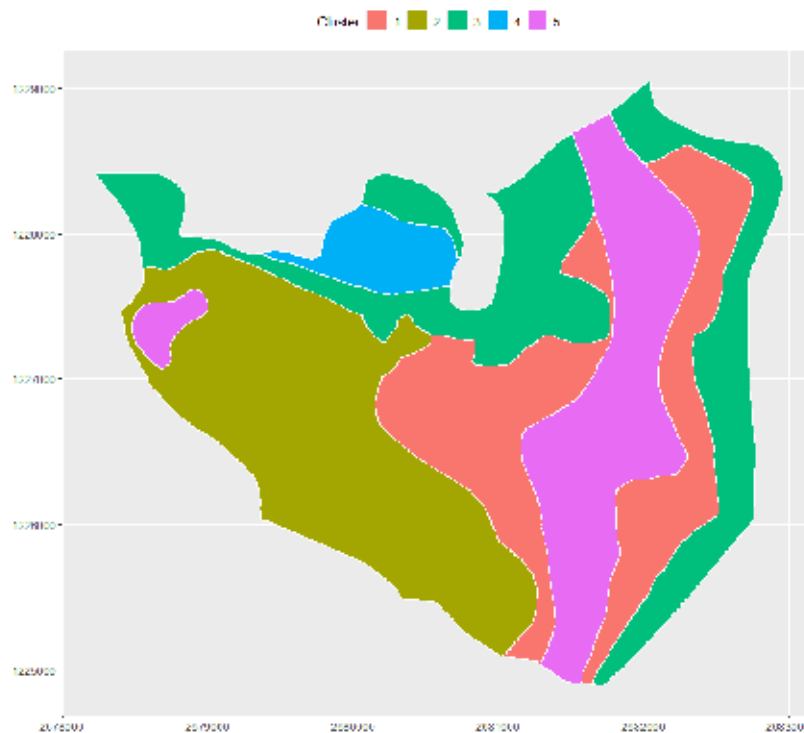


Abbildung 5 Ergebnisse der Klassifizierung nach der manuellen Anpassung.

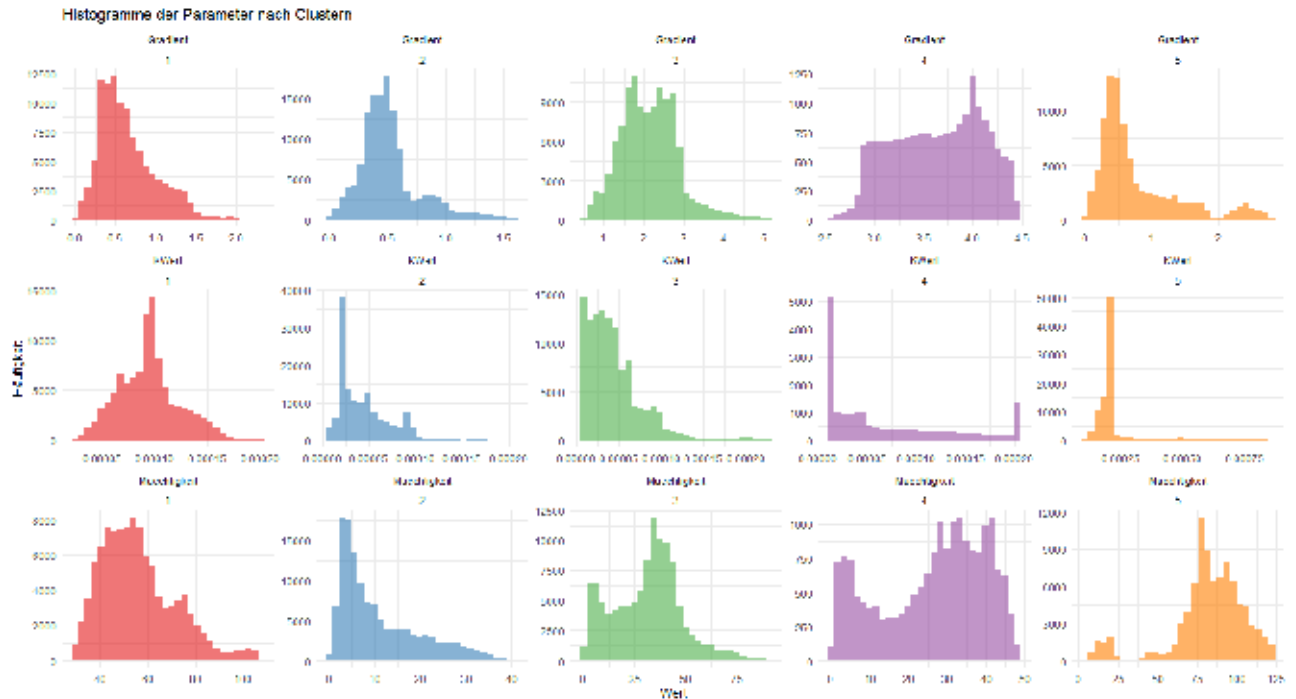


Abbildung 6 Verteilung der Parameter Gradient (%), Durchlässigkeit (m/s) und Mächtigkeit (m) für jedes angepasste Cluster von Abbildung 5.

Tabelle 1 Medianwerte pro Cluster für den hydraulischen Gradient, die hydraulische Durchlässigkeit und die Mächtigkeit.

Cluster	Gradient (%)	Durchlässigkeit (m/s)	Mächtigkeit (m)
1	0.57	9.4E-05	54
2	0.47	3.4E-05	8
3	2.10	3.6E-05	34
4	3.68	4.4E-05	29
5	0.54	2.0E-04	84

3.6 Numerische Simulationen

Für die Beurteilung der thermischen Auswirkungen der Doubletten-Systeme auf die Grundwassertemperatur wurden die Doubletten-Systeme pro Cluster und pro ausgeglichenen und unausgeglichenen Energielastprofil mit einem numerischen Verfahren simuliert. Es wurde eine Betriebszeit von 20 Jahren simuliert.

Dabei wurde die Software FEFLOW 8.1 verwendet, welches auf dem Finite Elemente Verfahren basiert.

Pro Cluster wurde ein vereinfachtes thermisches 3D Grundwasserströmungsmodell (sogenanntes Box-Modell) erstellt. Das Box-Modell ist 2'000 m lang und 500 m breit. Diese Box-Modelle sind mit dem Grundwassergradient geneigt und in drei geologische Schichten vereinfacht unterteilt (siehe auch Tabelle 2):

- Deckschicht: schlecht durchlässig, in vier Layers diskretisiert;
- Grundwasservorkommen: gut durchlässig, die Mächtigkeit hängt vom Cluster ab, in 2 m mächtige Layers diskretisiert;
- Grundwasserstauer: schlecht durchlässig, in vier Layers diskretisiert.

Die Anzahl an Knoten, prismatischen 3D Elements und numerischen Schichten pro Cluster ist in Tabelle 2 angegeben.

Es wird angenommen, dass das Grundwasser gespannt ist. Die Cluster-Parameter (Gradient, Durchlässigkeit und Mächtigkeit) und die konstanten Parameter sind in Tabelle 1 und Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 2 Anzahl an Knoten, prismatischen 3D Elements, numerischen Schichten und Anlagentyp.

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5
Anzahl Knoten	218'484	56'644	109'242	101'150	218'484
Anzahl Elemente	419'813	102'973	205'946	190'104	419'813
Anzahl Layers (gesamt)	39	15	29	24	53
Anzahl Layers «Deckschicht»	7	6	7	4	6
Anzahl Layers «Grundwasserleiter»	27	4	17	15	42
Anzahl Schichten «Stauer»	5	5	5	5	5
Anlagentyp	bidirektional	bidirektional	rezirkulativ	rezirkulativ	bidirektional

Da für die vorliegende Fragestellung nur Temperaturänderungen durch den Betrieb der Anlage relevant sind, wurden saisonal auftretende natürliche Änderungen der Grundwassertemperatur im Modell nicht berücksichtigt. Nur die relative Temperaturänderung, die durch die geplanten Anlagen verursacht wird, wurde simuliert.

Bidirektionale Doublette-Anlagen sind nur bei niedrigen Grundwassergradient ($< 1\%$) sinnvoll. Deshalb wurde für Cluster 3 und 4 rezirkulative Anlagen eingesetzt. Bei Cluster 5 ist die hydraulische Durchlässigkeit gross, was zu einer relativ hohen Grundwasserfliessgeschwindigkeit führt. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde Teste durchgeführt. Diese zeigen im Vergleich zu einer rezirkulativen Anlage, dass bei einer bidirektionalen Anlage die Einflusszone kleiner und die Energierückgewinnung grösser ist. Aus diesem Grund wurde für Cluster 5 eine direktionale Anlage eingesetzt.

Tabelle 3 Hydraulische und thermische Parameter des vereinfachten thermischen 3D Grundwasserströmungsmodell

Parameter	Wert
<i>Hydraulischer Gradient</i>	<i>Gemäss Cluster</i>
Deckschichten	
K-Wert	$1 \cdot 10^{-7}$ m/s
Porosität	0.15
Volumetrische Wärmekapazität ¹	2.0 MJ/m ³ /K
Wärmeleitfähigkeit ¹	1.8 W/m/K
Longitudinale Dispersion	20 m
Laterale Dispersion	5 m
Mächtigkeit	~35.76 m
Grundwasserleiter	
<i>K-Wert</i>	<i>Gemäss Cluster</i>
Porosität	0.15
Volumetrische Wärmekapazität ¹	2.3 MJ/m ³ /K
Wärmeleitfähigkeit ¹	1.7 W/m/K
Longitudinale Dispersion	20 m
Laterale Dispersion	5 m
<i>Mächtigkeit</i>	<i>Gemäss Cluster</i>
Stauer (z.B. Molassefels)	
K-Wert	$1 \cdot 10^{-7}$ m/s
Porosität	0.15
Volumetrische Wärmekapazität ¹	2.1 MJ/m ³ /K
Wärmeleitfähigkeit ¹	2.6 W/m/K
Longitudinale Dispersion	20 m
Laterale Dispersion	5 m
Mächtigkeit	~ 40 m

¹ SIA-Norm 384/6:2021

3.7 Auswertung

3.7.1 Festlegung der Einflusszonen

Anlagen zur Grundwasserwärmenutzung beeinflussen sich gegenseitig, was zu einem Kaskadeneffekt führen kann. Der Kaskadeneffekt beschreibt die gegenseitige Beeinflussung von mehreren Anlagen zur Grundwasserwärmenutzung, die entlang derselben Grundwasserströmung betrieben werden. Dadurch können sich die thermischen Veränderungen im Grundwasser verstärken und ausweiten, was zu einer größeren thermischen Fahne führt, als es bei der Nutzung durch nur eine einzige Anlage der Fall wäre. Zur Vermeidung dieses Kaskadeneffekts wurde eine Beeinflussung bestehender Anlagen von $\Delta T = 0.1 \text{ K}$ als vertretbar betrachtet. Daher wurde die Isotherme von 0.1 K als Einflusszone von Dubletten-Anlagen festgelegt.

Es wurde festgestellt, dass die untere Kulmination in allen Simulationen innerhalb der 0.1 K Isotherme lag. Die untere Kulmination ist der am weitesten in der Strömungsrichtung entfernte Punkt, von dem beim Förderbetrieb noch Grundwasser in den Brunnen zuläuft. Jenseits der unteren Kulmination fließt das Grundwasser vom Brunnen weg. Wenn die Anlagen so platziert werden, dass sich ihre Einflusszonen nicht überlappen, ist sichergestellt, dass die Anlagen keine thermische Fahne stromaufwärts anziehen. Die Beeinflussung beschränkt sich auf die zuströmenden thermischen Fahnen.

3.7.2 Temperaturänderung in 100 m Abstrom

Gemäss Gewässerschutzverordnung (GSchV) [1] und der Vollzugshilfe «Wärmenutzung aus Boden und Untergrund» [2] darf die Temperatur des Grundwassers durch Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem natürlichen Zustand um höchstens 3 K verändert werden. In der unmittelbaren Nachbarschaft des Versickerungsbauwerks, d.h. gemäss [2] in einem Umkreis von maximal 100 m , darf die Veränderung mehr als 3 K betragen (3K-Regel). Für jede Simulation wurde daher überprüft, ob die 3K-Regel eingehalten wurde.

3.7.3 Effizienz der Wärmerückgewinnung

Ein Nutzungsjahr besteht aus zwei Wärmenutzungszyklen: einem Heizzyklus und einem Kühlzyklus. Während dem Heizzyklus wird Wärme aus dem Grundwasser entzogen (Wärmeentzug $E_i^\uparrow$), d.h. es wird kaltes Wasser im Grundwasser gespeichert. Im Gegensatz dazu wird während dem Kühlzyklus Wärme aus dem Grundwasser eingegeben (Wärmeeingabe $E_i^\downarrow$), d.h. es wird warmes Wasser im Grundwasser gespeichert. Im Idealfall wird während dem Kühlzyklus ein Teil des während dem Heizzyklus gespeicherten Kaltwassers gefördert. Während dem nächsten Heizzyklus wird im Idealfall ein Teil dieses Warmwassers ebenfalls gefördert, nach dem Prinzip der saisonalen Wärmespeicherung.

Die Effizienz der Wärmerückgewinnung im Zyklus i entspricht dem Verhältnis der im aktuellen Zyklus i entnommenen Energie $E_i^\uparrow$ zu der im vorherigen Zyklus $i-1$ im Grundwasser gespeicherten Energie $E_{i-1}^\downarrow$. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um einen Heiz- oder Kühlzyklus handelt:

$$\eta_i = \frac{E_i^\uparrow}{E_{i-1}^\downarrow} = \frac{\int_{t_i}^{t_{i+1}} Q_i \rho c (T_i^\uparrow - T_{GW}) dt}{\int_{t_{i-1}}^{t_i} Q_{i-1} \rho c (T_{i-1}^\downarrow - T_{GW}) dt}$$

Mit Q_i die Förderrate beim Zyklus i (m/s), c die spezifische Wärmekapazität des Wassers (J/kg/K), ρ die Wasserdichte (kg/m³), $T_i^\uparrow$ die Temperatur (°C) des entnommenen Grundwassers beim Zyklus i , $T_{i-1}^\downarrow$ die Temperatur (°C) des zugeführten Grundwassers beim Zyklus $i-1$, T_{GW} die natürliche Temperatur (°C) des Grundwassers, t_{i-1} die Anfangszeit des Zyklus $i-1$ und t_i die Anfangszeit des Zyklus i .

Da nur die relative Temperaturänderung, die durch die geplanten Anlagen verursacht wird, simuliert wird, ist T_{GW} gleich Null gesetzt.

Bei Heizzyklen wird die Energie nur für $T_i^\uparrow > T_{GW}$ und $T_{i-1}^\downarrow > T_{GW}$ berechnet. Bei Kühlzyklen wird die Energie nur für $T_i^\uparrow < T_{GW}$ und $T_{i-1}^\downarrow < T_{GW}$ berechnet. Abbildung 7 zeigt schematisch wie die Wärmespeicherung und -rückgewinnung für bidirektionalen und rezirkulativen Nutzungen berechnet wird.

Für jede Simulation wurde die Effizienz der Wärmerückgewinnung über die Simulationszeit ohne den ersten und letzten Zyklus gemittelt.

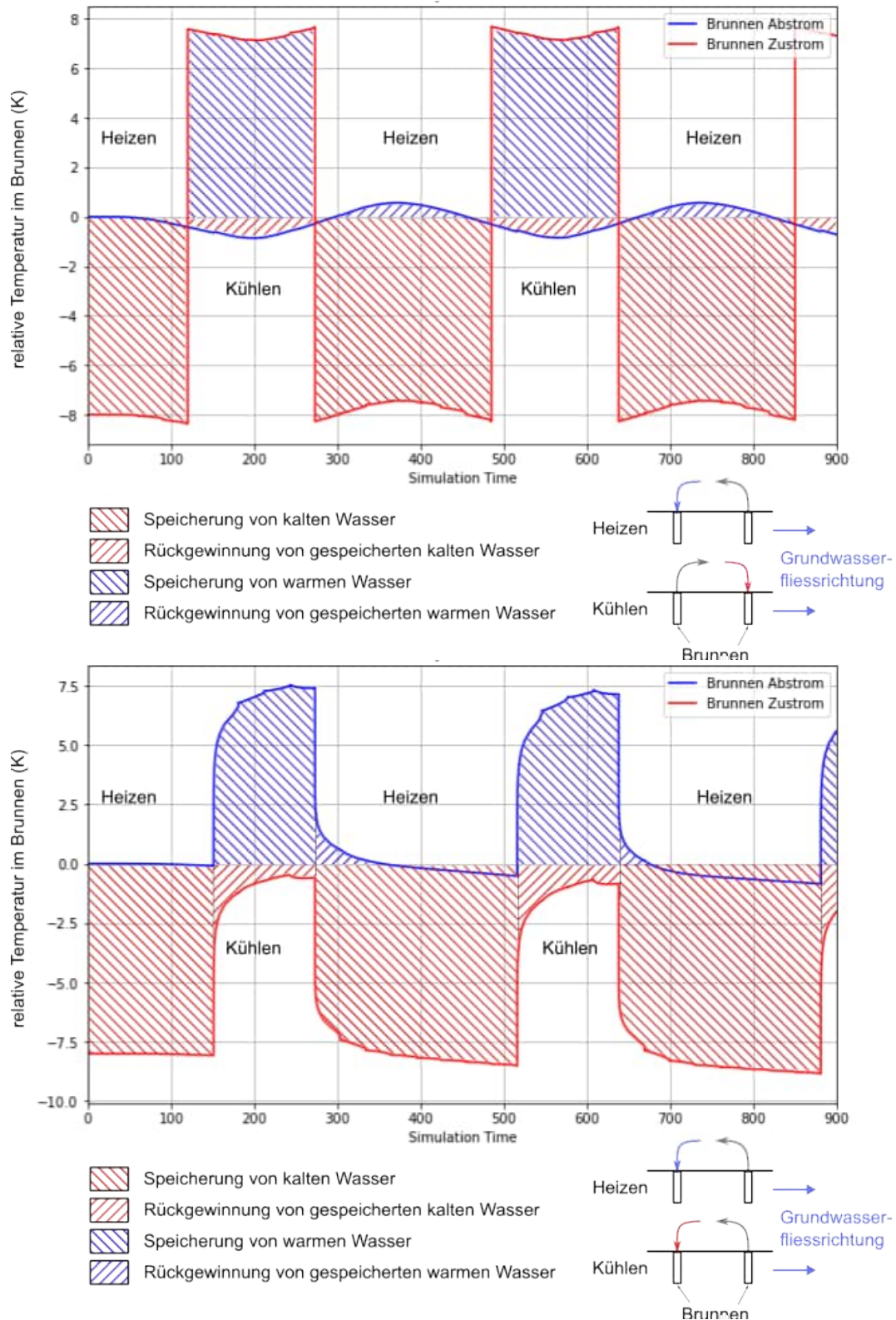


Abbildung 7 Schematische Darstellung der Berechnung der Wärmespeicherung und -rückgewinnung für bidirektionalen (oben) und rezirkulativen (unten) Nutzungen.

3.7.4 Ermittlung des Wärmenutzungspotenzial mit einem Packing-Algorithmus

In jedem Cluster wird die Anzahl der entsprechenden Anlagen maximiert, ohne dass sich die Einflusszonen der Anlagen überlappen.

In einem ersten Schritt wird versucht, Anlagen nach einem engen Rastermuster zu platzieren. Nur Anlagen werden platziert, die folgende Bedingungen erfüllen:

- Der Mittelpunkt der Einflusszonen der Anlage liegt innerhalb des Polygons des zugehörigen Clusters;
- Die Einflusszonen liegen vollständig innerhalb des Simulationsperimeters;
- Die Einflusszonen überlappen sich nicht.

Die Anlagen und ihre Einflusszonen werden entlang der Grundwasserströmungslinien platziert.

In einem zweiten Schritt wird anhand eines iterativen Verfahrens versucht, die Anlagen mit schrittweisen Bewegungen kompakter zu platzieren, um zusätzlichen Anlagen einzufügen. Bei jeder Iteration werden die oben genannten Bedingungen überprüft. Wenn die Anzahl der Anlagen über die Iterationen konstant bleibt, werden die Iterationen abgebrochen.

Da die Einflusszonen der Anlagen mit unausgeglichem Lastprofil teilweise deutlich grösser sind als die mit ausgeglichenem Lastprofil, wurden einige Teilgebiete der Cluster zusammengefasst (siehe Abbildung 8).

Das Wärmenutzungspotenzial pro Cluster entspricht der Summe der Leistung der Anlagen pro Cluster, d.h. je mehr Einflusszonen in einem Cluster liegen, desto grösser ist das Wärmenutzungspotenzial.

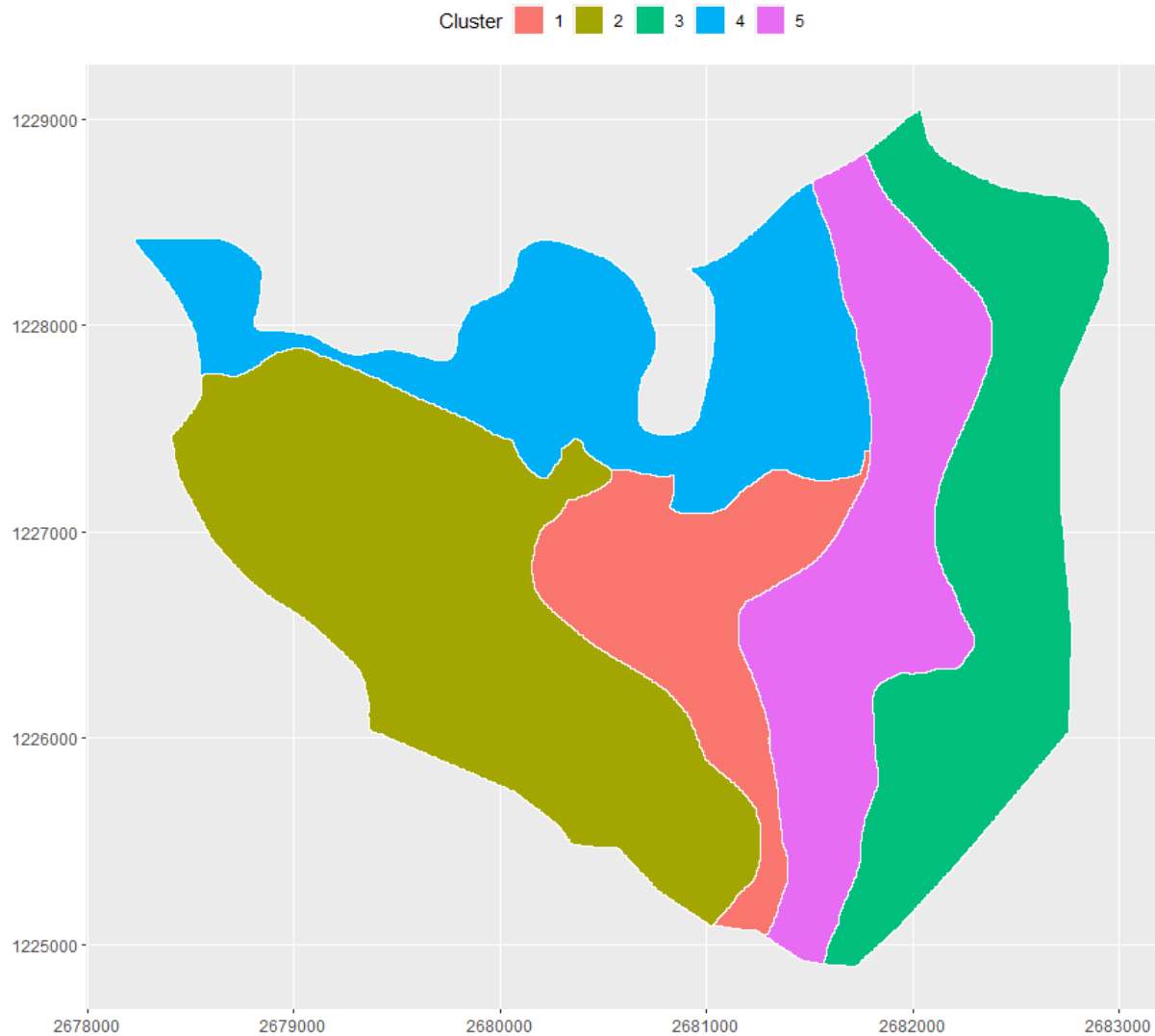


Abbildung 8 Angepasste Clusters für die Ermittlung des Wärmenutzungspotenzial mit unausgeglichene Energielastprofilen.

4. Untersuchungsergebnisse

4.1 Numerische Simulationen

Die ermittelte Einflusszonen (0.1-K-Isotherme) der Anlagen sind in Abbildung 9 dargestellt. In Tabelle 4 sind pro Simulation die Länge und Breite der Einflusszonen (m), die Temperaturänderung (K) in 100 m Abstand der Anlage und die mittlere Wärmerückgewinnungseffizienz (%).

Trotz höheren Grundwassergradienten weisen die rezirkulative Anlagen bei ausgeglichenen Energielastprofil die kleinsten Einflusszonen auf. Bei unausgeglichener Energielastprofil werden die Einflusszonen der rezirkulativen Anlagen signifikant grösser.

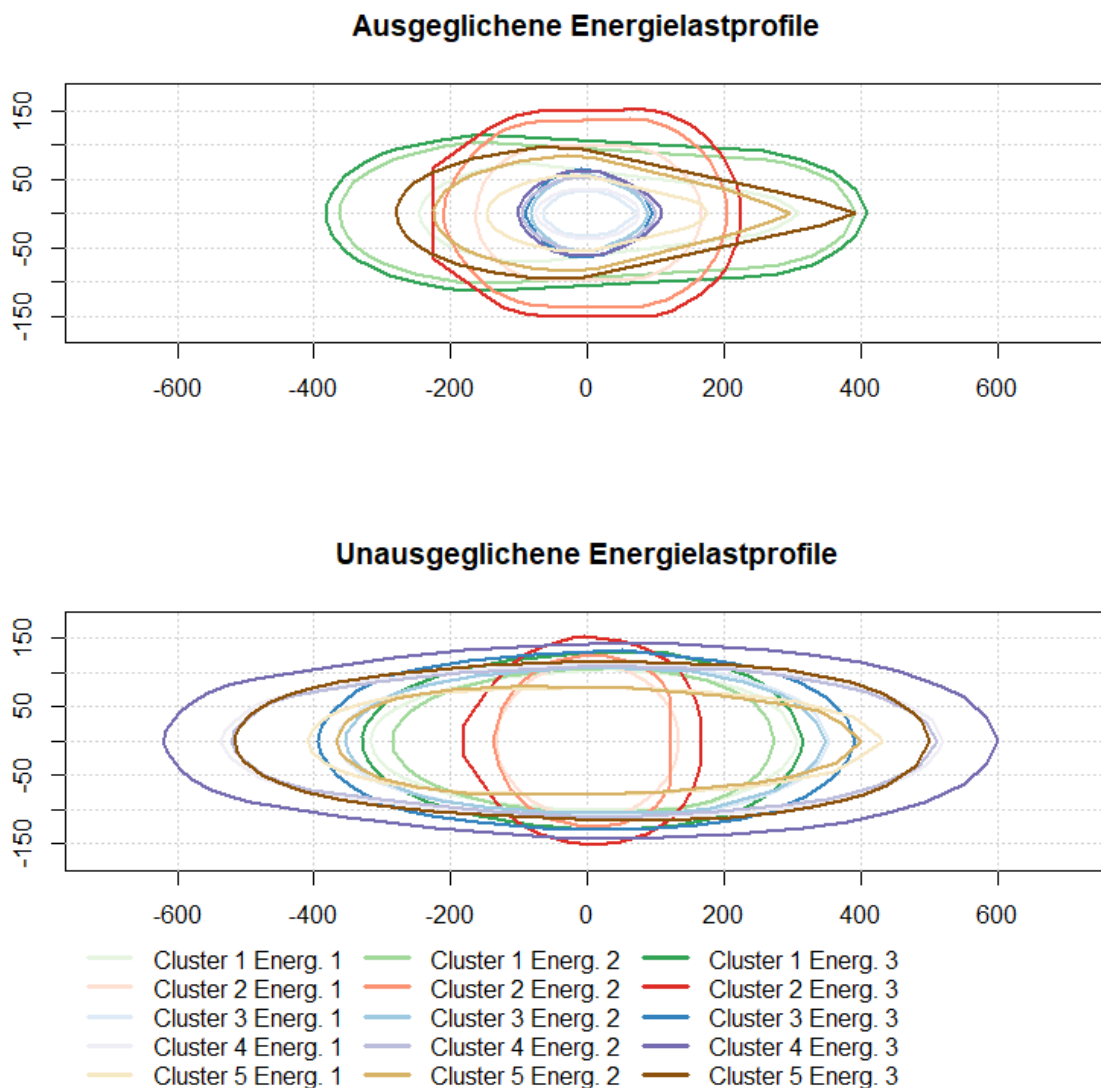


Abbildung 9 0.1-K-Isotherme für alle Simulationen.

Tabelle 4 Simulationsergebnisse: Länge und Breite der Einflusszonen (m), Temperaturänderung in 100m Abstrom (K) und Effizienz der Wärmerückgewinnung (%).

Cluster	Anlage und Energieprofil			Einflusszonen		ΔT 100 m (K)	Effizienz der Wärmerückgewinnung (%)
	Anlagentyp	Energieprofil	Ausgeglichen?	Länge (m)	Breite (m)		
1	bidirektional	1	ja	554	144	0.51	11
1	bidirektional	2	ja	754	205	1.09	21
1	bidirektional	3	ja	790	228	1.27	26
1	bidirektional	1	nein	625	205	0.72	1
1	bidirektional	2	nein	558	212	0.52	6
1	bidirektional	3	nein	644	258	1.00	8
2	bidirektional	1	ja	330	196	0.48	49
2	bidirektional	2	ja	413	275	0.97	52
2	bidirektional	3	ja	449	304	1.18	50
2	bidirektional	1	nein	268	226	0.04	6
2	bidirektional	2	nein	258	251	0.06	24
2	bidirektional	3	nein	349	304	0.09	20
3	rezirkulativ	1	ja	138	68	0.01	0
3	rezirkulativ	2	ja	171	111	0.03	1
3	rezirkulativ	3	ja	185	129	0.04	2
3	rezirkulativ	1	nein	719	219	0.87	0
3	rezirkulativ	2	nein	703	215	0.82	3
3	rezirkulativ	3	nein	786	262	1.51	5
4	rezirkulativ	1	ja	151	74	0.02	1
4	rezirkulativ	2	ja	195	108	0.06	5
4	rezirkulativ	3	ja	209	125	0.07	7
4	rezirkulativ	1	nein	1055	227	0.62	0
4	rezirkulativ	2	nein	1031	220	0.59	2
4	rezirkulativ	3	nein	1220	285	1.13	4
5	bidirektional	1	ja	323	111	0.30	5
5	bidirektional	2	ja	520	168	0.78	7
5	bidirektional	3	ja	671	191	1.04	9
5	bidirektional	1	nein	840	157	0.34	1
5	bidirektional	2	nein	766	159	0.23	2
5	bidirektional	3	nein	1016	232	0.46	3

Die Effizienz der Wärmerückgewinnung ist bei rezirkulativen Anlagen grundsätzlich tief (bis max. 9%). Bei unausgeglichene entspricht die Effizienz der Wärmerückgewinnung v.a. die Rückgewinnung von gespeichertem kaltem Wasser. Bei bidirektionalen Anlagen ist Effizienz der Wärmerückgewinnung tendenziell höher. Dies ist v.a. auf die kleine Fliessgeschwindigkeiten (kleiner Gradient und kleine hydraulische Durchlässigkeit) zurückzuführen. Bei unausgegleichenen Energielastprofilen sinkt die Effizienz der Wärmerückgewinnung überproportional für das Energielastprofil Nr. 1.

Die 3 K-Regel, d.h. die maximale Temperaturänderung in 100 m Abstom der Anlage darf nicht mehr als 3 K betragen, ist für alle Simulationen eingehalten. Über alle Simulation beträgt die maximale Temperaturänderung in 100 m Abstom der Anlage 1.51 K, was darauf hinweist, dass Anlagen mit Leistungen grösser als 750 kW zulässig sind.

4.2 Packing Algorithmus

Für die Ermittlung des Wärmenutzungspotenzial wurde ein Packing-Algorithmus verwendet. Dieses wurde für jede Konfiguration (Gebäudetyp und Energielastprofil) angewendet. Die Ergebnisse des Packing-Algorithmus für jede Konfiguration können dem Anhang 3 entnommen werden. In Gebieten, in denen der Gradient räumlich stark variiert, können umso weniger Anlagen platziert werden, je länger ihre Einflusszonen sind.

4.3 Wärmenutzungspotenzial

Das Wärmenutzungspotenzial sowie das spezifische Wärmenutzungspotenzial des Untersuchungsperimeters für die drei ausgeglichenen und unausgegleichenen Energielastprofile sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass das Wärmenutzungspotenzial primär für Nutzungen mit einer höheren Leistung (Energielastprofil 3) grösser ist (Faktor 3-4). Zudem weisen die Ergebnisse darauf hin, dass das Wärmenutzungspotenzial für Anlage mit ausgeglichenen Profilen grösser ist (Faktor 3 bis 5). Das Wärmenutzungspotenzial pro Cluster-Polygon kann dem Anhang 4 entnommen werden.

Gemäss den Angaben des AFU [10] beträgt die kumulierte maximale Leistung der bestehenden Nutzungen für die Wärmegewinnung 4.3 MW und für die Kältegewinnung 6.4 MW (Stand 17.05.2024). Die mittlere maximale Leistung der bestehenden Anlagen beträgt ca. 240 kW, was ungefähr dem Energielastprofil 2 (Gewerbe- und Verwaltungsbau mit einer Heizleistung von 250 kW) entspricht. Unter der Annahme, dass die Energielastprofile der bestehenden Nutzungen unausgegleichen sind, könnten noch ca. 10 MW installiert werden.

Bei mittleren und grösseren Anlagen ist mit einer mittleren Effizienz der Wärmerückgewinnung von ca. 10% über das Untersuchungsgebiet zu rechnen (Tabelle 5).

Tabelle 5 Wärmenutzungspotenzial und mittlere Effizienz der Wärmerückgewinnung des Untersuchungsgebiet für die drei ausgeglichenen und unausgeglichenen Energielastprofile.

	Energielastprofil 1	Energielastprofil 2	Energielastprofil 3
<i>Wärmenutzungspotenzial (MW)</i>			
Ausgeglichen	20.34	32.75	93.75
Unausgeglichen	4.20	16.75	30.00
<i>Spezifisches Wärmenutzungspotenzial (W/m²)</i>			
Ausgeglichen	1.79	2.89	8.26
Unausgeglichen	0.37	1.48	2.64
<i>Mittlere Effizienz der Wärmerückgewinnung (%)</i>			
Ausgeglichen	6	10	12
Unausgeglichen	4	13	13

5. Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen, dass das Wärmenutzungspotenzial im Untersuchungsgebiet proportional zu der Grösse der Nutzungen ist.

Bei grossem Gradienten sind rezirkulative Anlagen effizienter in Hinsicht auf die Grösse der Einflusszone und die Wärmerückgewinnung. Jedoch bleibt die Wärmerückgewinnung bei grossen Gradienten oder grossen Grundwassergeschwindigkeit relativ klein, auch wenn die Profile ausgeglichen sind (oft < 10%). Die Wärmerückgewinnung ist am grössten, wenn der Gradient klein ist, die Energielastprofile ausgeglichen sind und eine mittlere oder grosse Leistung gewählt wird.

Das Wärmenutzungspotenzial des Baarenbeckens ist noch lange nicht erschöpft. Die Ergebnisse zeigen, dass die installierte Leistung verdreifacht werden kann.

Die angewandte Methodik ist flexibel und weniger rechenintensiv als eine Modellierung aller Nutzungen gleichzeitig. Die Methodik berücksichtigt den thermischen Kaskadeneffekt sowie die Grundwasserstromlinien und kann für jeden beliebigen Grundwasserleiter angewendet werden.

Die Berechnungen beruhen auf Medianwerten, die repräsentativ für Teilgebiete sind. Zudem wurde angenommen, dass der Untergrund homogen ist und dass die Dubletten auf der gleichen Grundwasserstromlinie liegen. In einem nächsten Schritt soll die Unsicherheit des ermittelten Wärmenutzungspotenzial quantifizieren werden. Zudem soll untersucht werden, wie der Trade-off zwischen Grösse der Einflusszone und Effizienz der Wärmerückgewinnung in Bezug auf den Anlagentyp und Energielastprofil ist.

Die Methodik basiert auf einer begrenzten Anzahl numerischer Simulationen, die komplex sind. Ein Vergleich mit analytischen Lösungen (z.B. mit dem niederländischen Tool Suites DoubletCalc und DoubletCalc2D¹) könnte erlauben, die Methodik zu vereinfachen und zu beschleunigen.

¹ <https://www.nlog.nl/en/tools>

Anhang 1 Energielastprofile

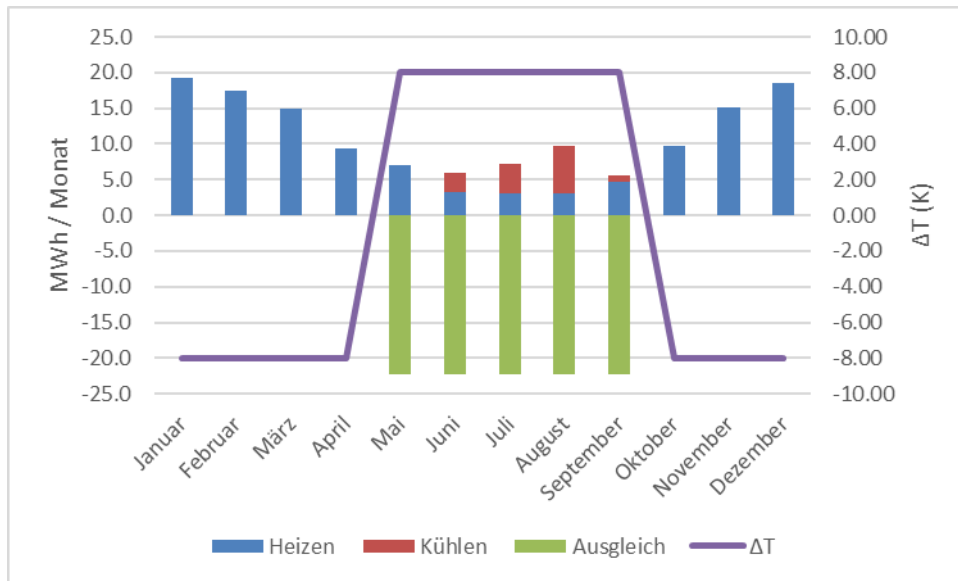


Abbildung 10 Energiebilanz für den Grundwasserwärmeentzug bzw. -eintrag für den Gebäudetyp 1 «Mehrfamilienhaus». ΔT ist die Temperaturspreizung. Die Spitzenleistung beträgt 60 kW. Der Ausgleich erfolgt z.B. über Solarthermie.

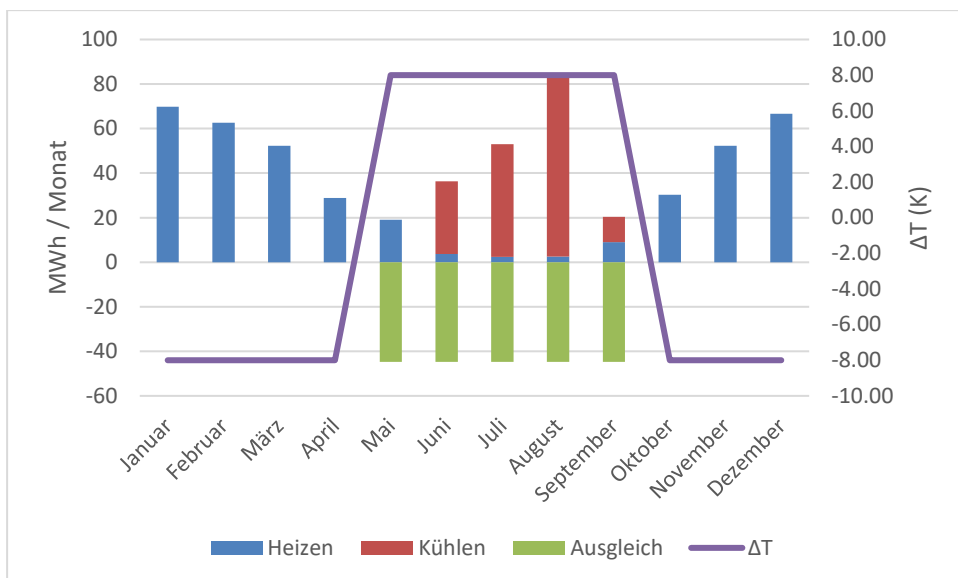


Abbildung 11 Energiebilanz für den Grundwasserwärmeentzug bzw. -eintrag für den Gebäudetyp 2 «Gewerbe- und Verwaltungsbau». ΔT ist die Temperaturspreizung. Die Spitzenleistung beträgt 250 kW. Der Ausgleich erfolgt über eine andere Quelle.

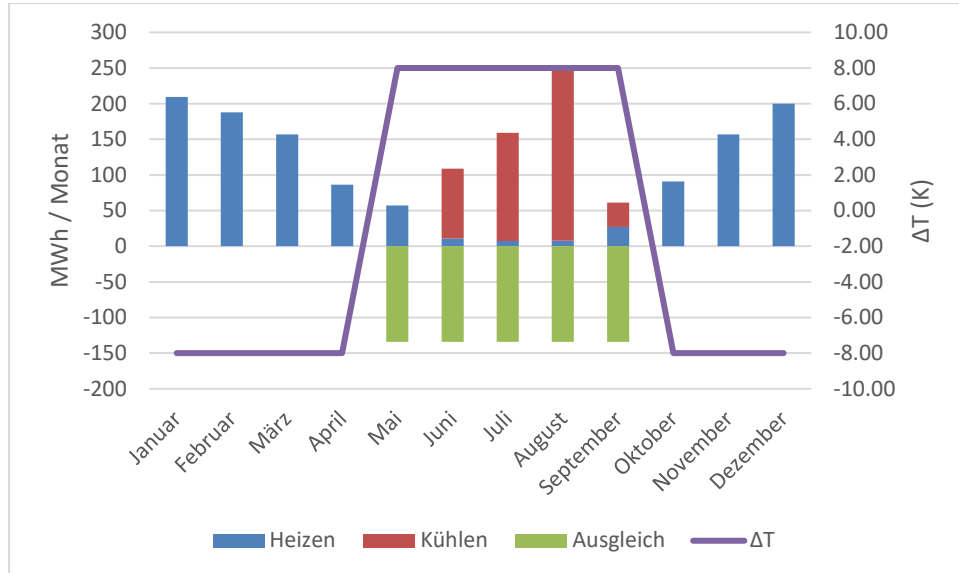


Abbildung 12 Energiebilanz für den Grundwasserwärmeentzug bzw. -eintrag für den Gebäudetyp 3 «Bürobau». ΔT ist die Temperaturspreizung. Die Spitzenleistung beträgt 750 kW. Der Ausgleich erfolgt über eine andere Quelle.

Anhang 2 Räumliche Verteilung Durchlässigkeit, Mächtigkeit, Gradient und Flurab- stand im Projektperimeter

GEOTEST

Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

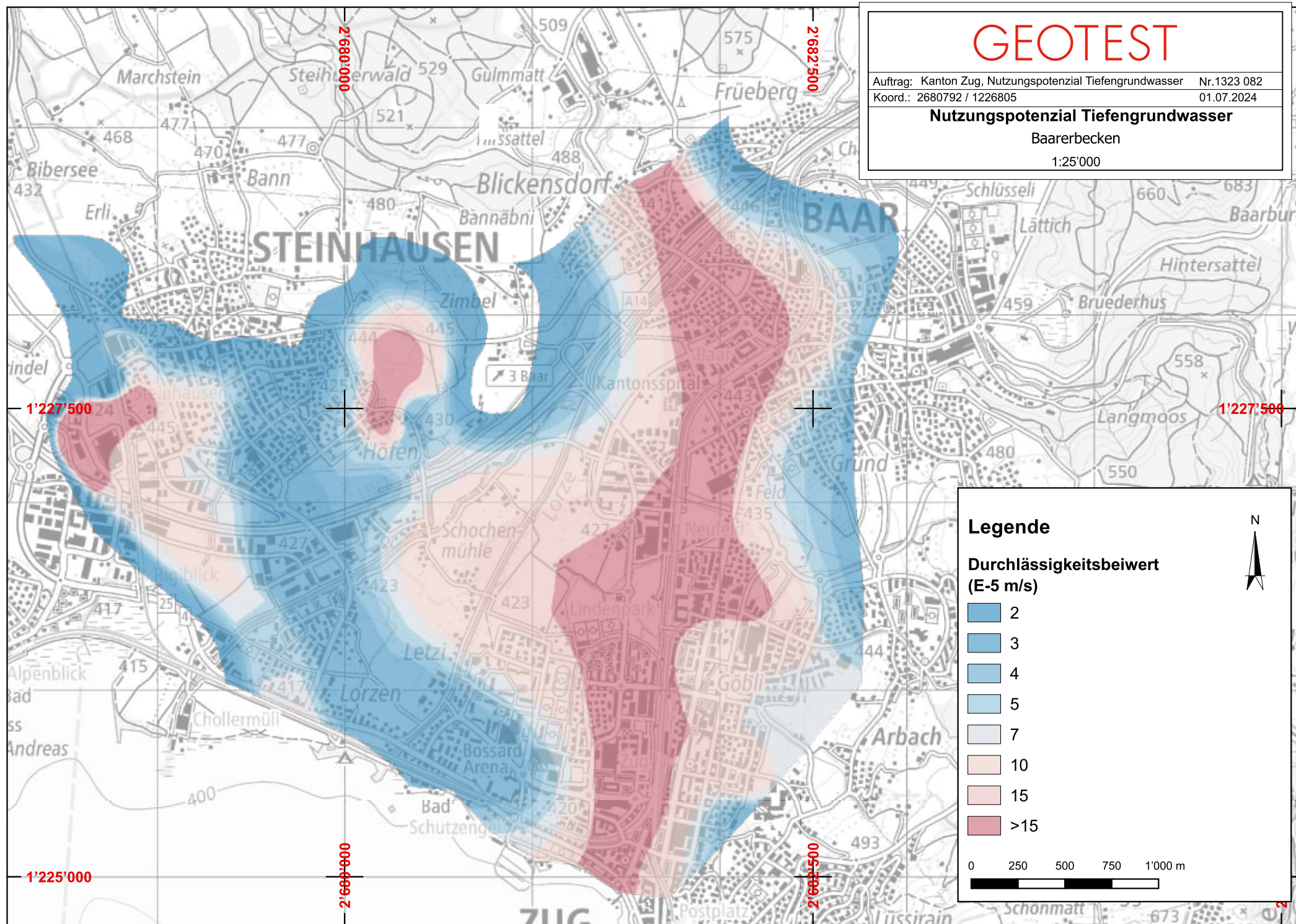
Koord.: 2680792 / 1226805

01.07.2024

Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser

Baarerbecken

1:25'000



GEOTEST

Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

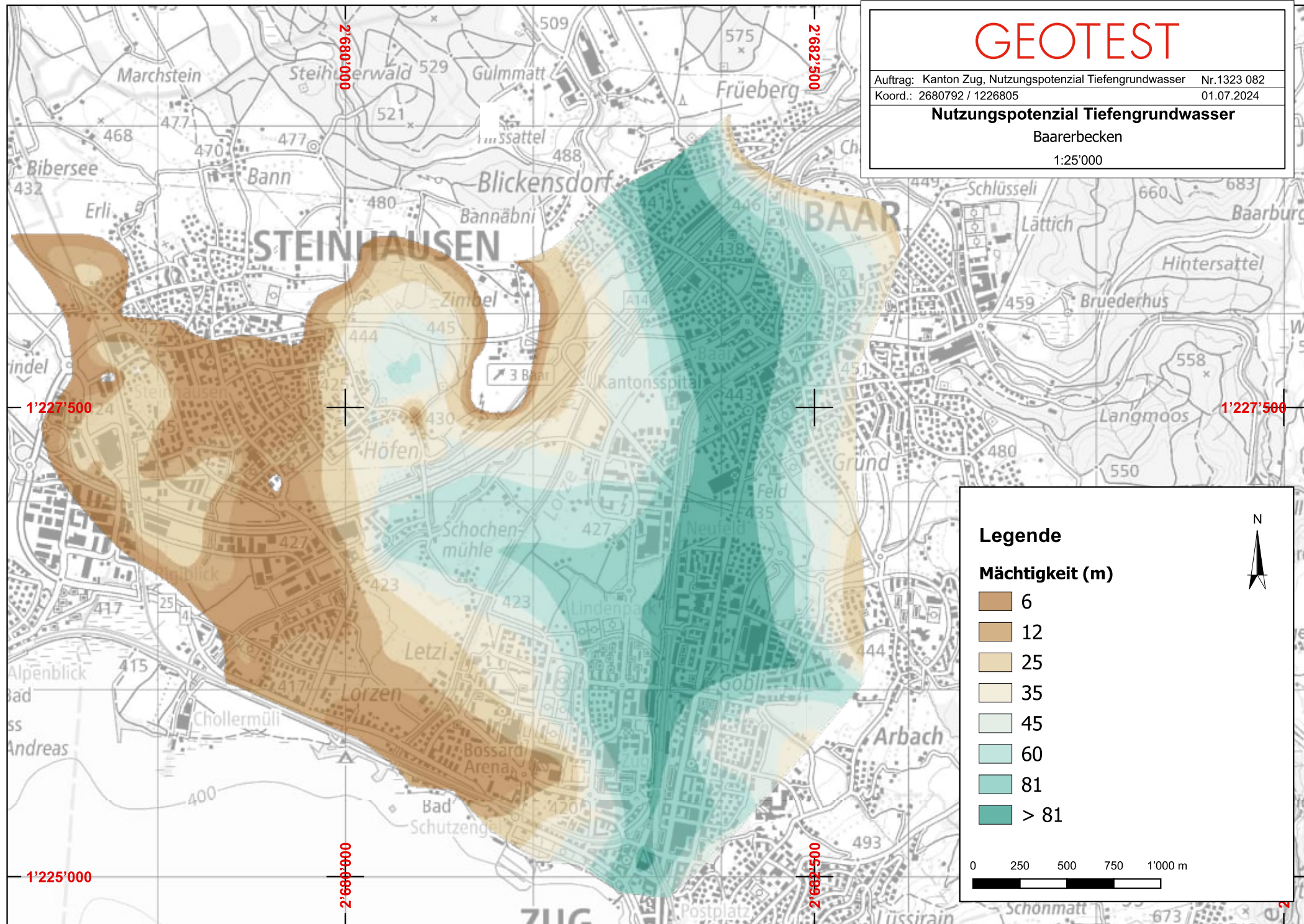
Koord.: 2680792 / 1226805

01.07.2024

Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser

Baarerbecken

1:25'000



GEOTEST

Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

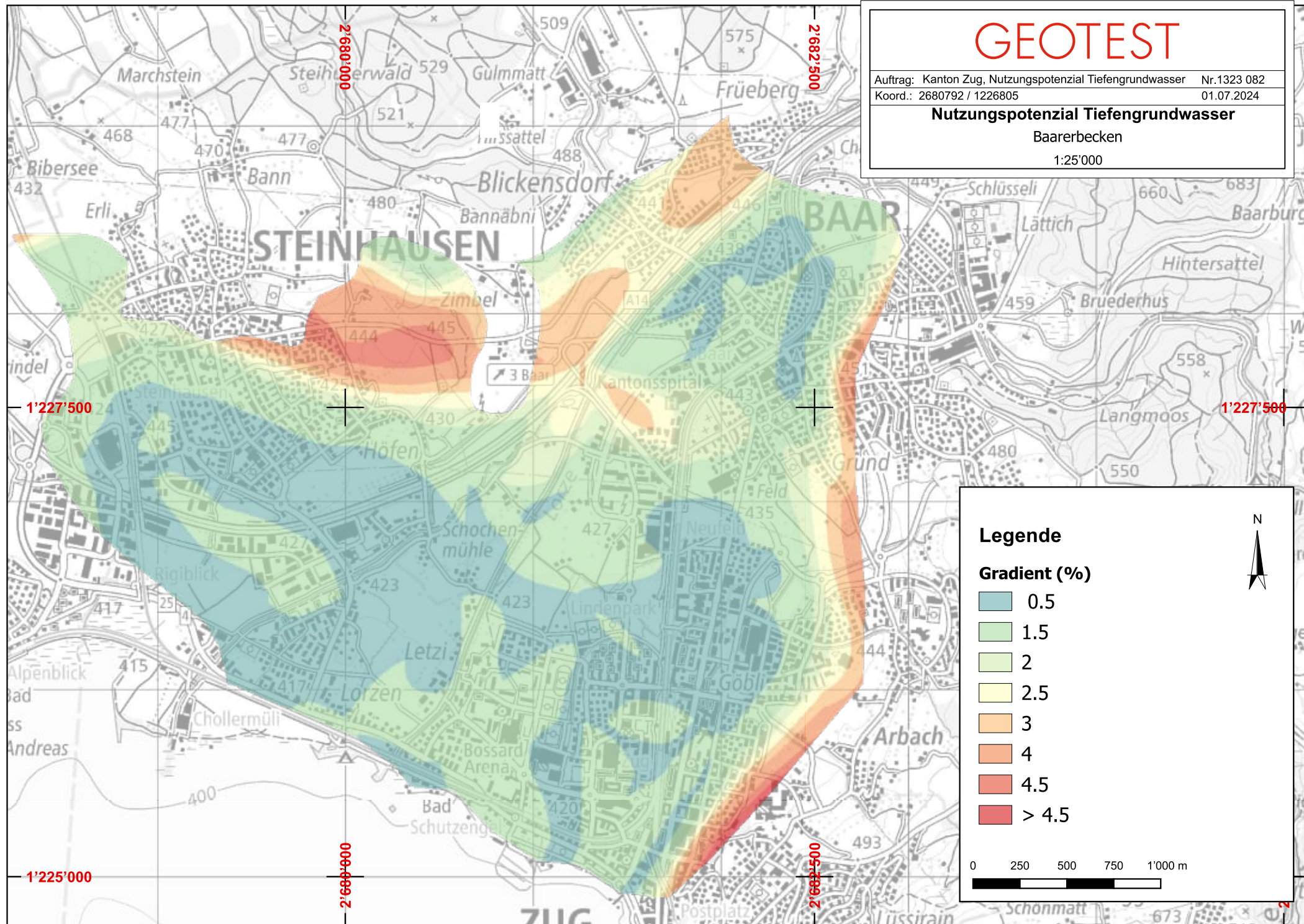
Koord.: 2680792 / 1226805

01.07.2024

Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser

Baarerbecken

1:25'000



GEOTEST

Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

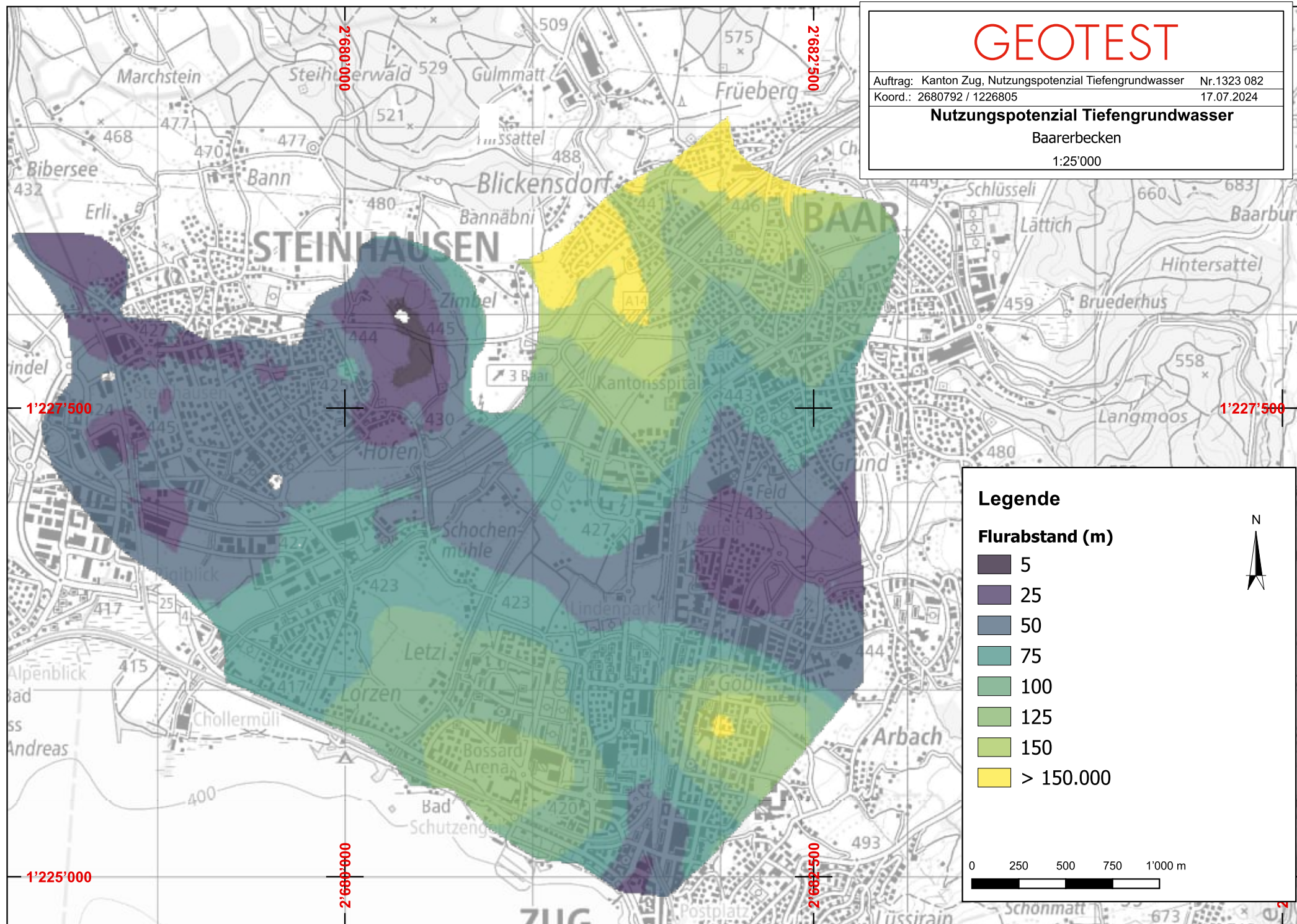
Koord.: 2680792 / 1226805

17.07.2024

Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser

Baarerbecken

1:25'000



Anhang 3 Simulationsergebnisse (Verteilung der Einflusszonen)

GEOTEST

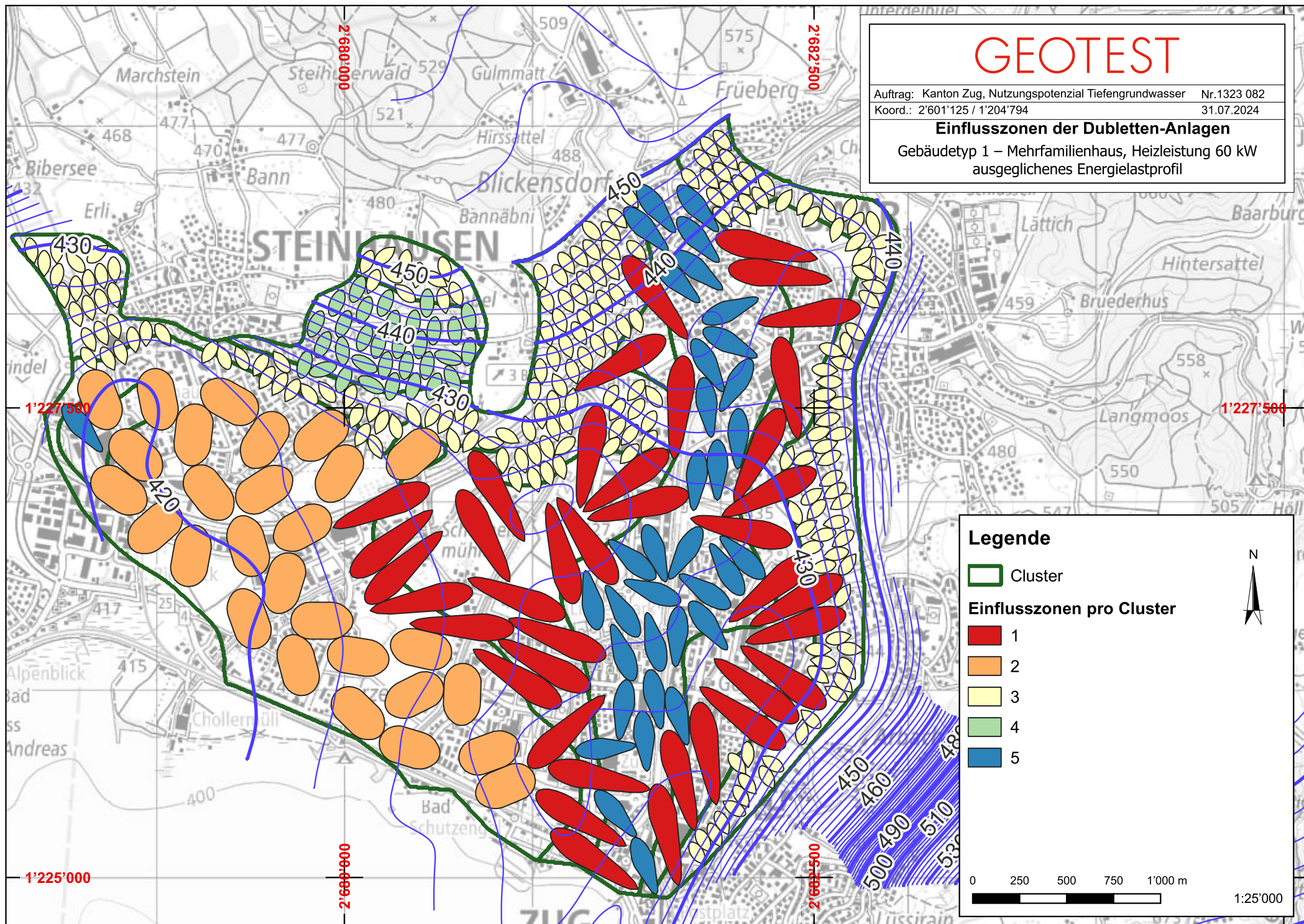
Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

Koord.: 2'601'125 / 1'204'794

31.07.2024

Einflusszonen der Dubletten-Anlagen

Gebäudetyp 1 – Mehrfamilienhaus, Heizleistung 60 kW
ausgeglichenes Energielastprofil



GEOTEST

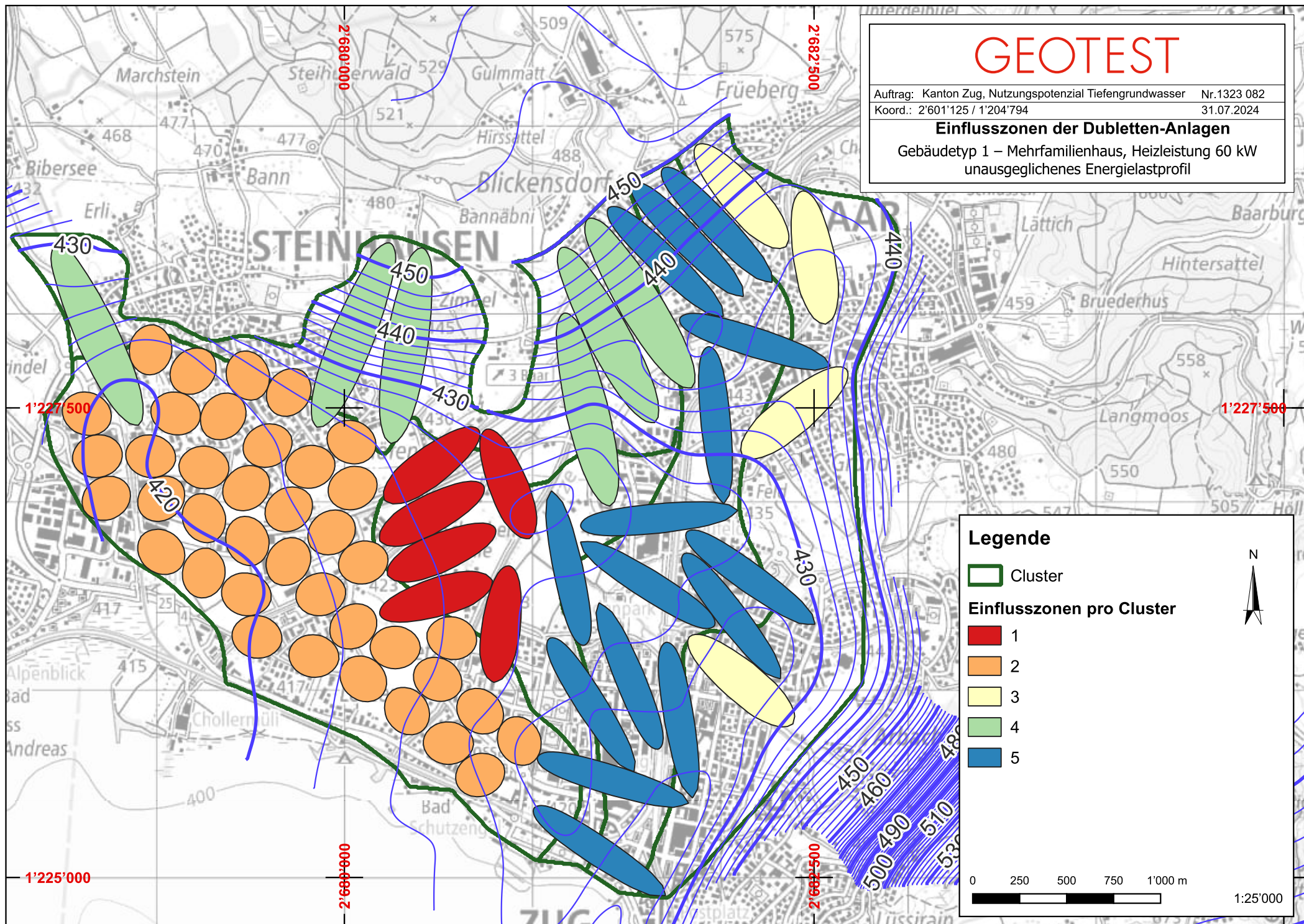
Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

Koord.: 2'601'125 / 1'204'794

31.07.2024

Einflusszonen der Dubletten-Anlagen

Gebäudetyp 1 – Mehrfamilienhaus, Heizleistung 60 kW
unausgeglichenes Energielastprofil



GEOTEST

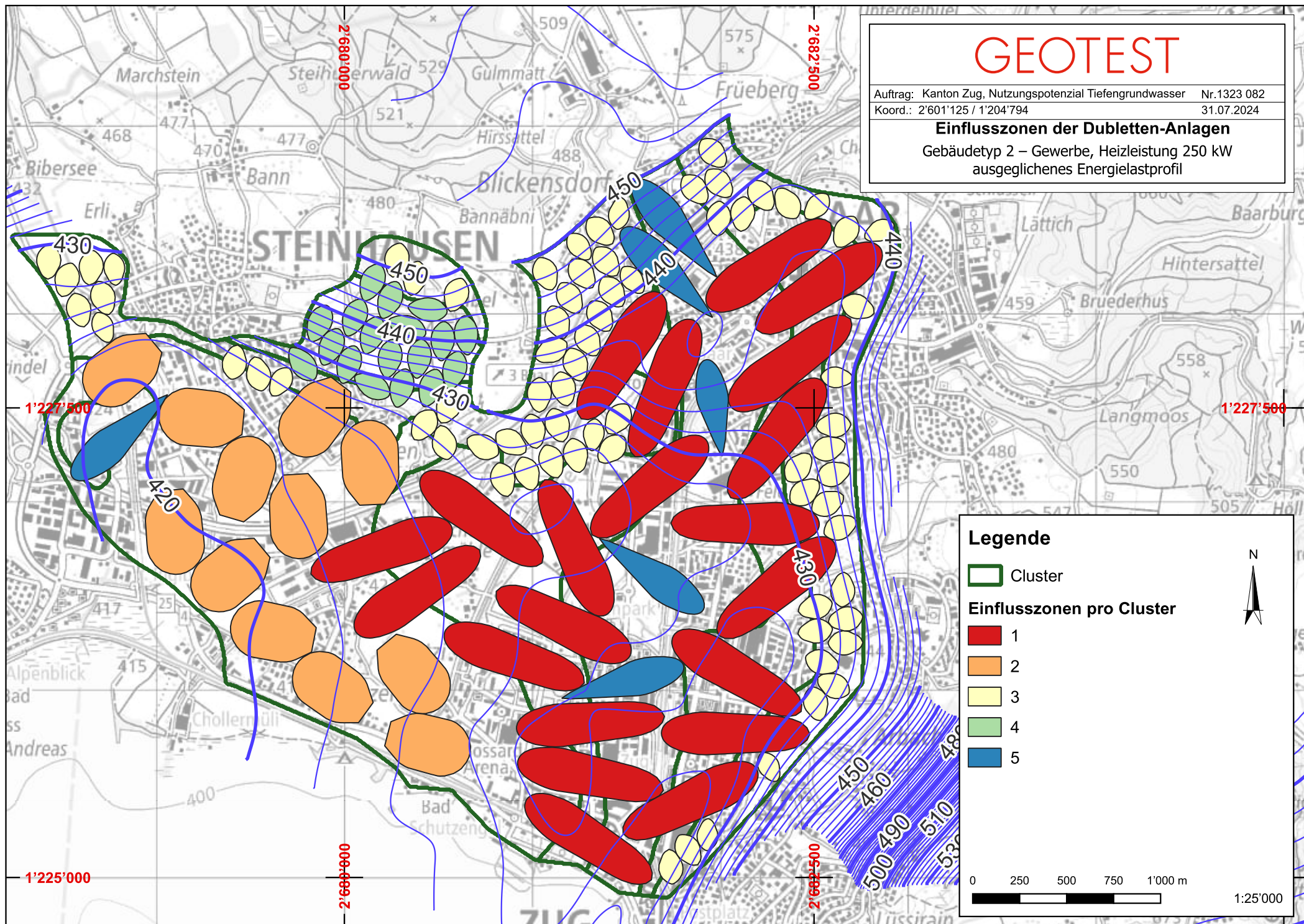
Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

Koord.: 2'601'125 / 1'204'794

31.07.2024

Einflusszonen der Dubletten-Anlagen

Gebäudetyp 2 – Gewerbe, Heizleistung 250 kW
ausgeglichenes Energielastprofil



GEOTEST

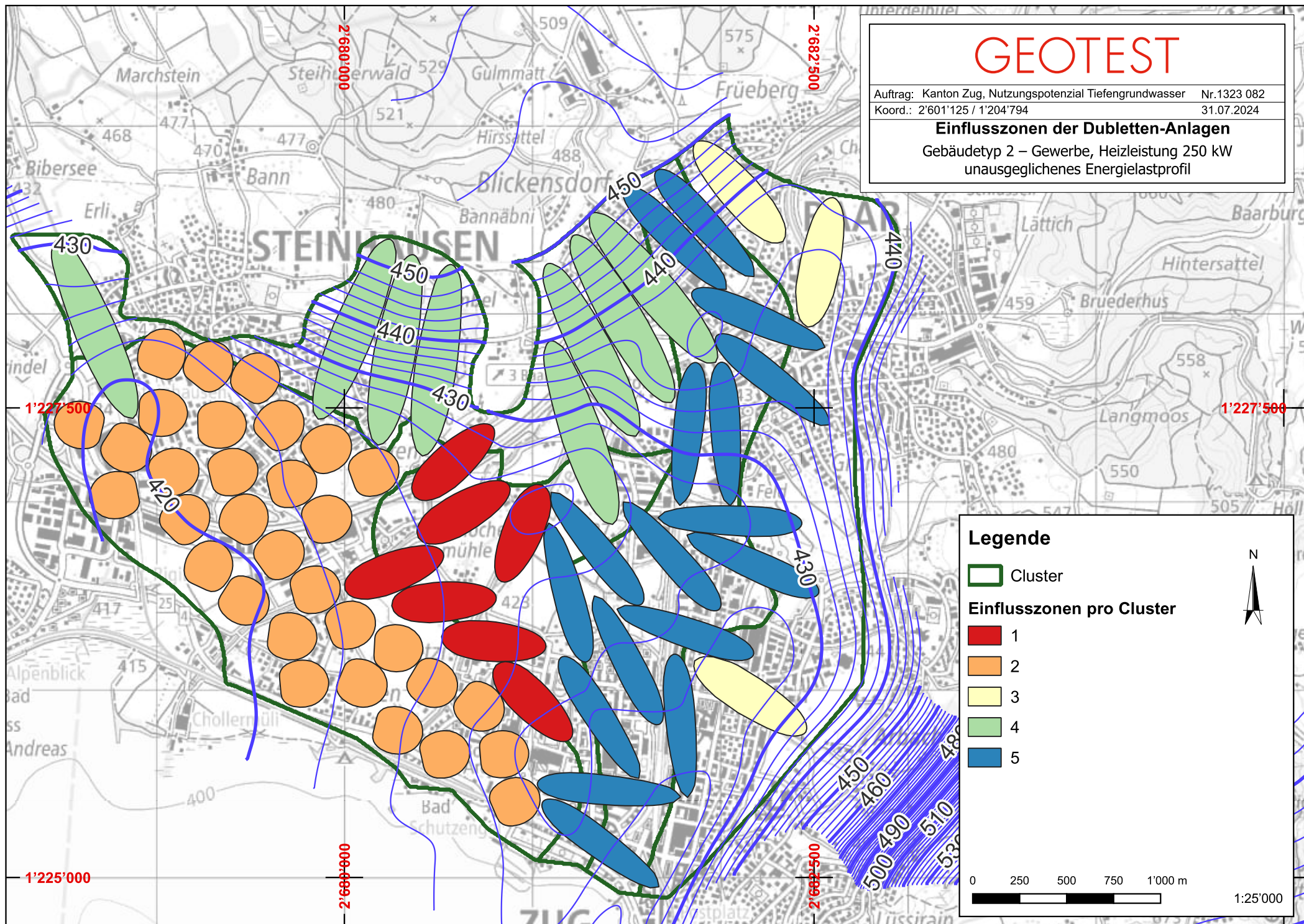
Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

Koord.: 2'601'125 / 1'204'794

31.07.2024

Einflusszonen der Dubletten-Anlagen

Gebäudetyp 2 – Gewerbe, Heizleistung 250 kW
unausgeglichenes Energielastprofil



GEOTEST

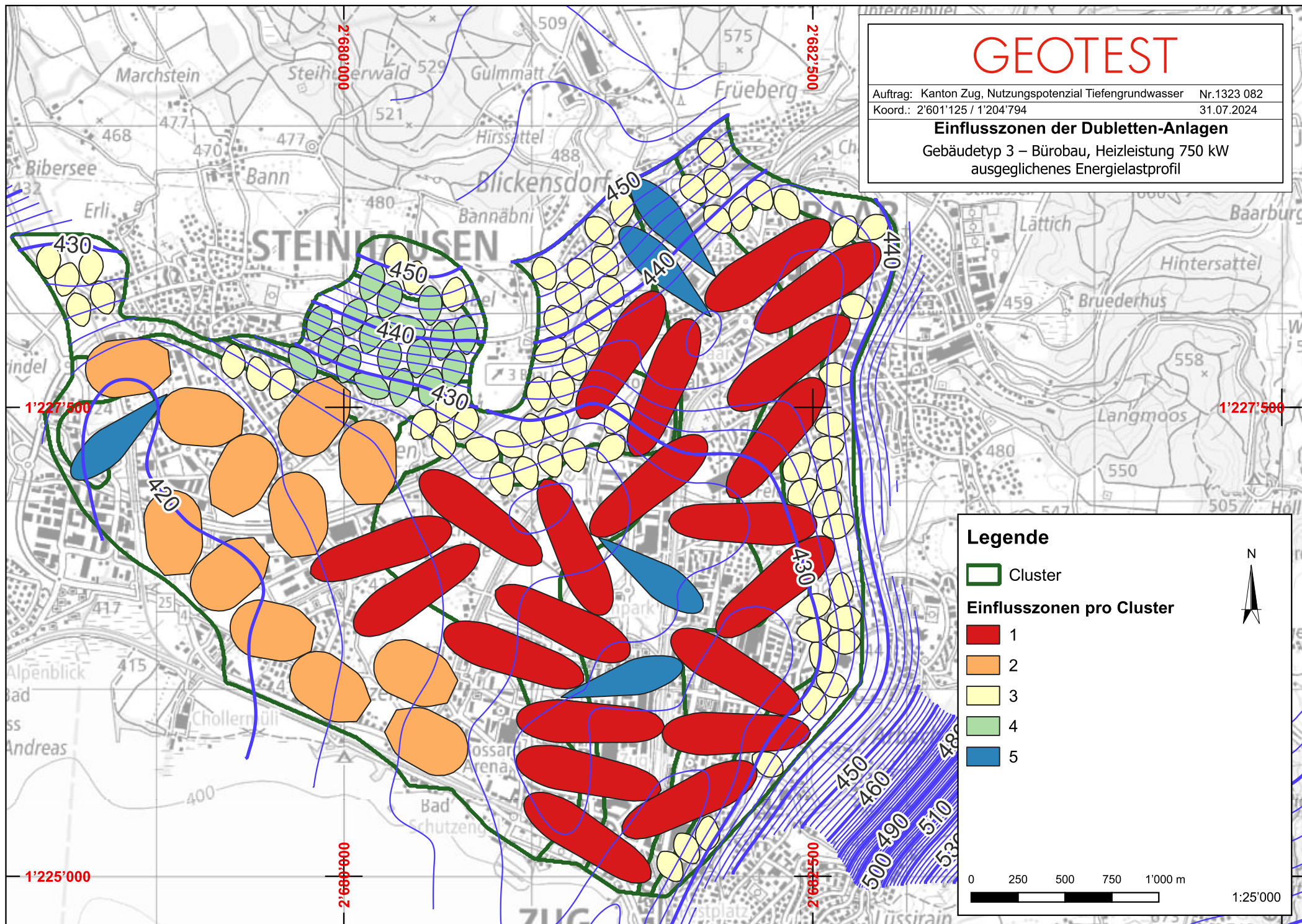
Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

Koord.: 2'601'125 / 1'204'794

31.07.2024

Einflusszonen der Dubletten-Anlagen

Gebäudetyp 3 – Bürobau, Heizleistung 750 kW
ausgeglichenes Energielastprofil



GEOTEST

Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

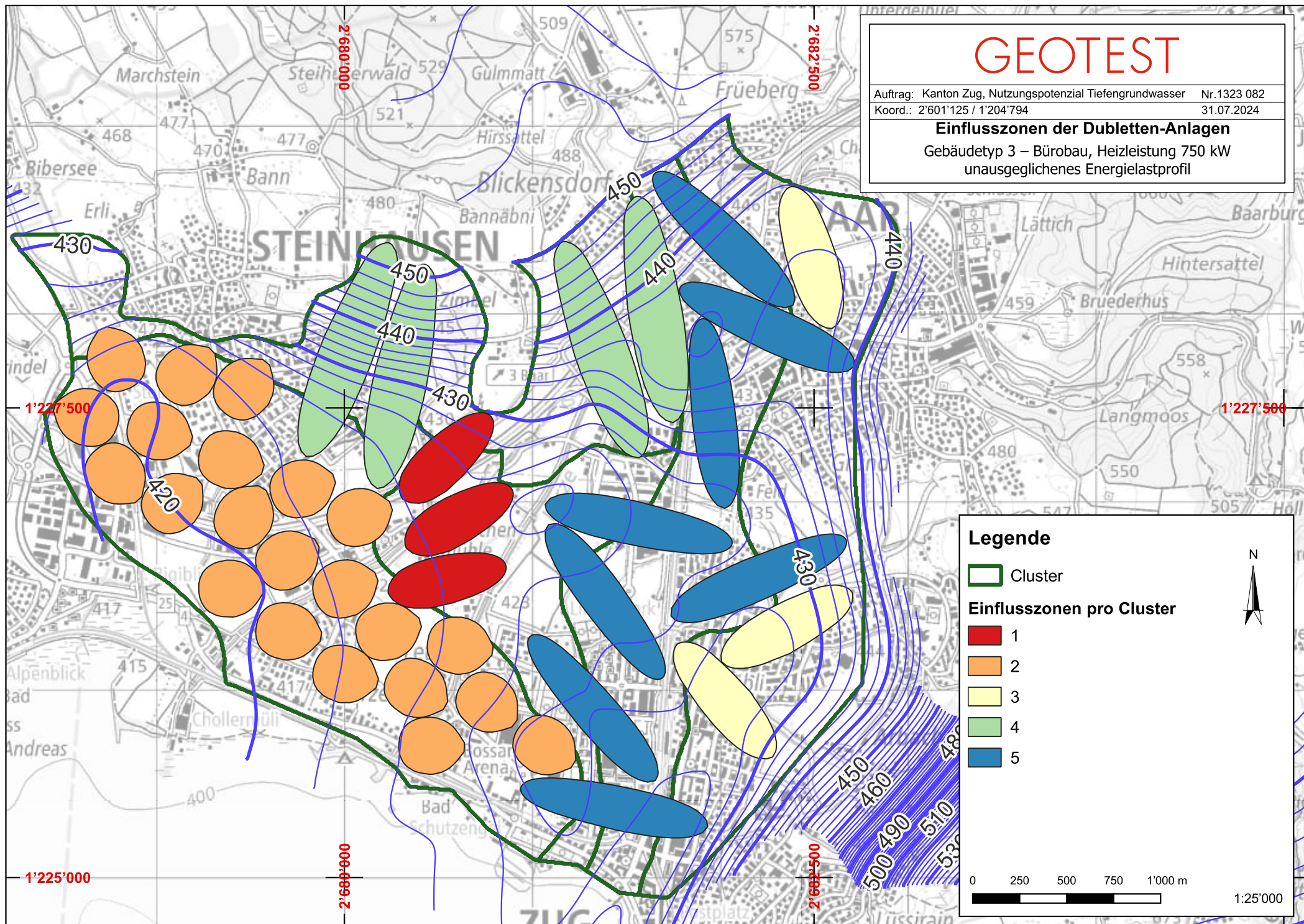
Koord.: 2'601'125 / 1'204'794

31.07.2024

Einflusszonen der Dubletten-Anlagen

Gebäudetyp 3 – Bürobau, Heizleistung 750 kW

unausgeglichenes Energielastprofil



Anhang 4 Wärmenutzungspotenzial

GEOTEST

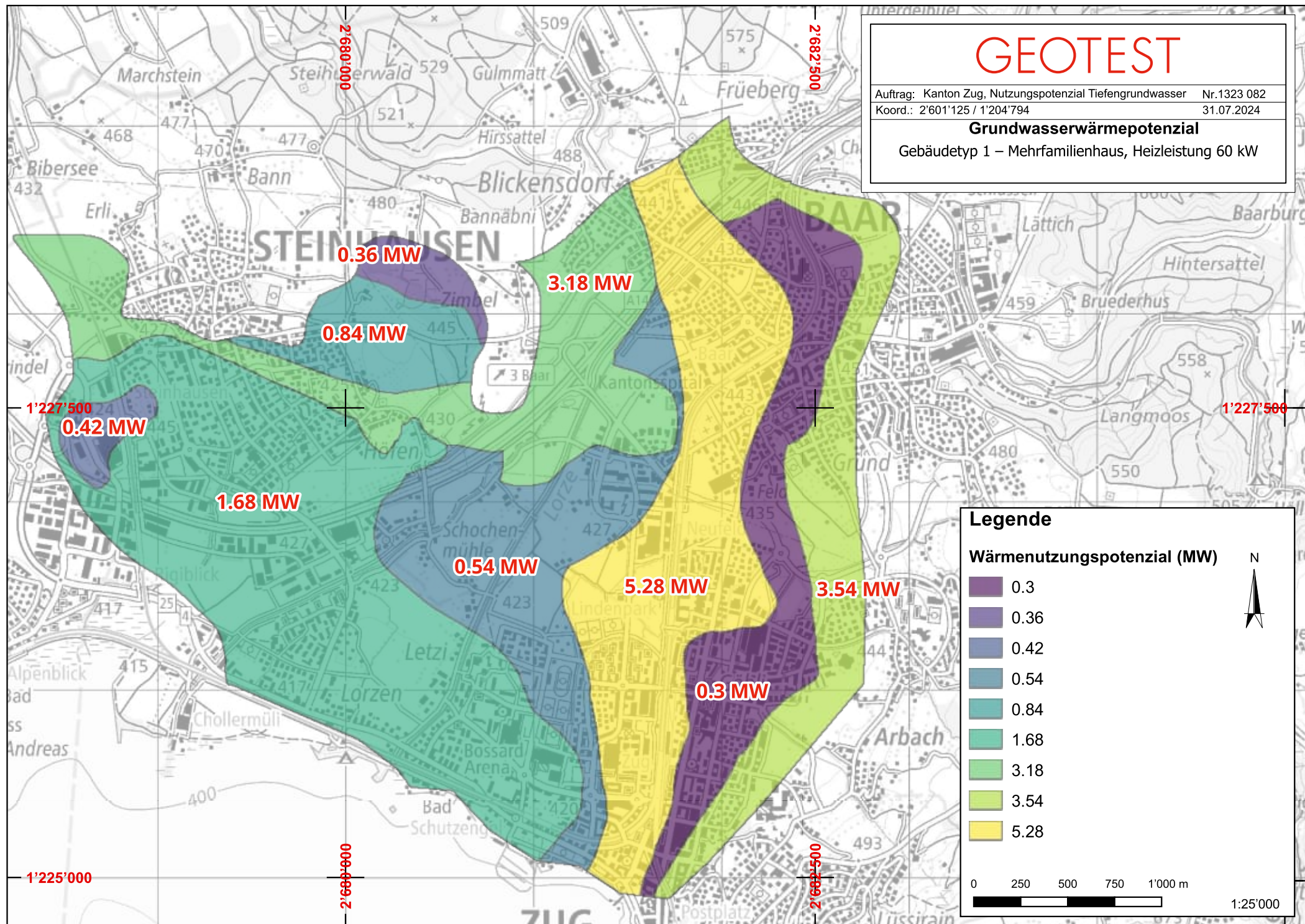
Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

Koord.: 2'601'125 / 1'204'794

31.07.2024

Grundwasserwärmepotenzial

Gebäudetyp 1 – Mehrfamilienhaus, Heizleistung 60 kW



GEOTEST

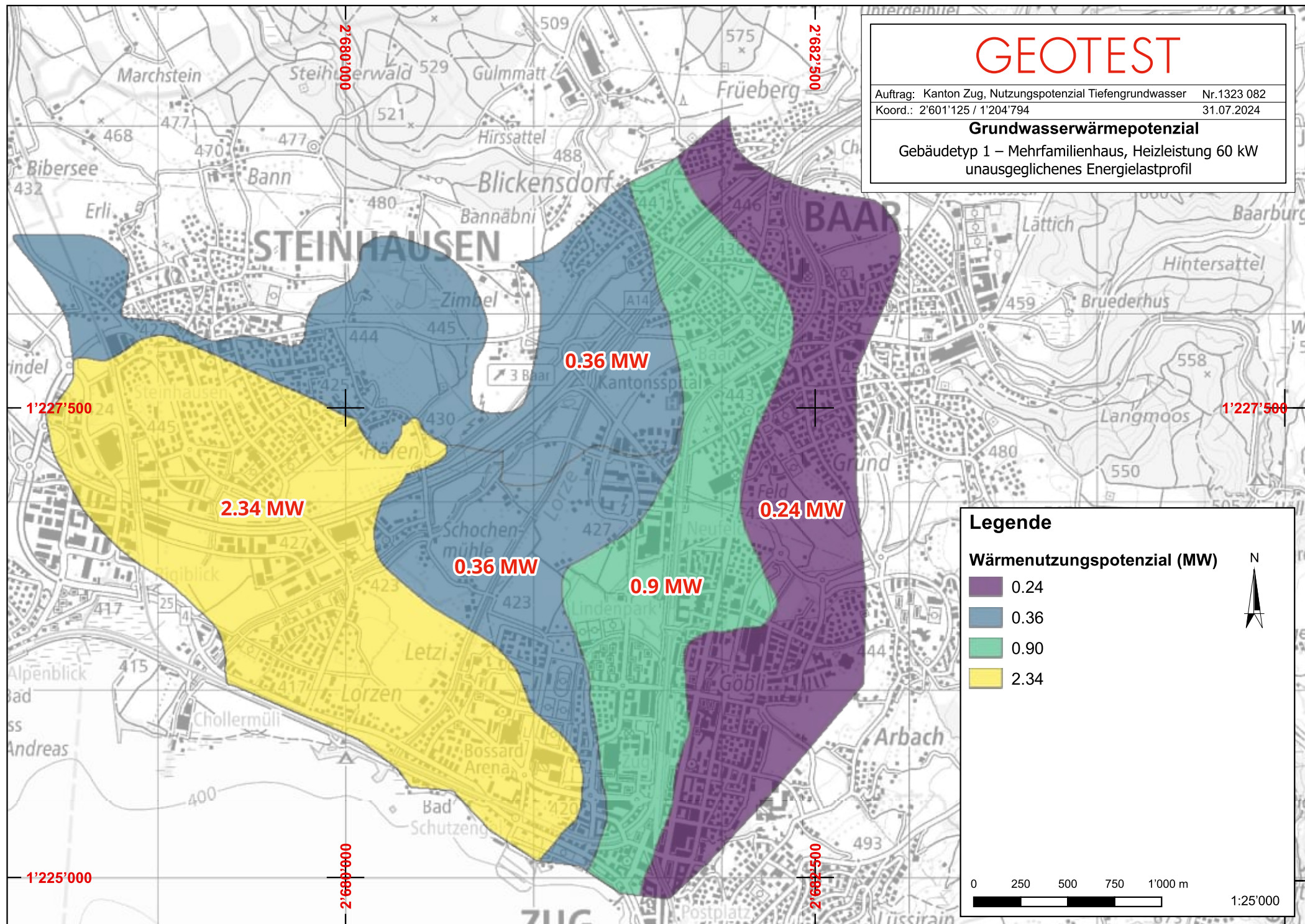
Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

Koord.: 2'601'125 / 1'204'794

31.07.2024

Grundwasserwärmepotenzial

Gebäudetyp 1 – Mehrfamilienhaus, Heizleistung 60 kW
unausgeglichenes Energielastprofil



Legende

Wärmenutzungspotenzial (MW)

0.24

0.36

0.90

2.34



0 250 500 750 1'000 m

1:25'000

GEOTEST

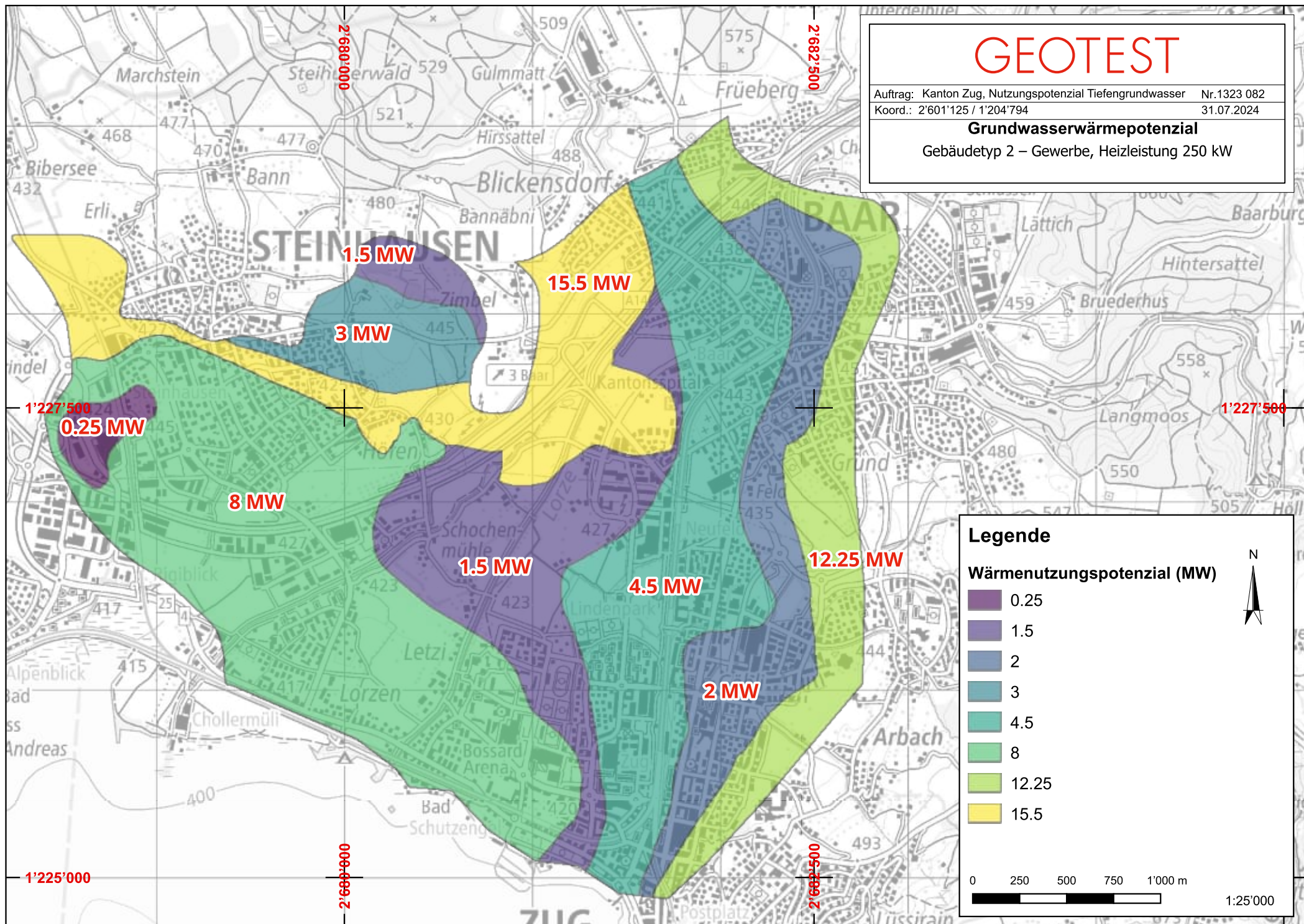
Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

Koord.: 2'601'125 / 1'204'794

31.07.2024

Grundwasserwärmepotenzial

Gebäudetyp 2 – Gewerbe, Heizleistung 250 kW

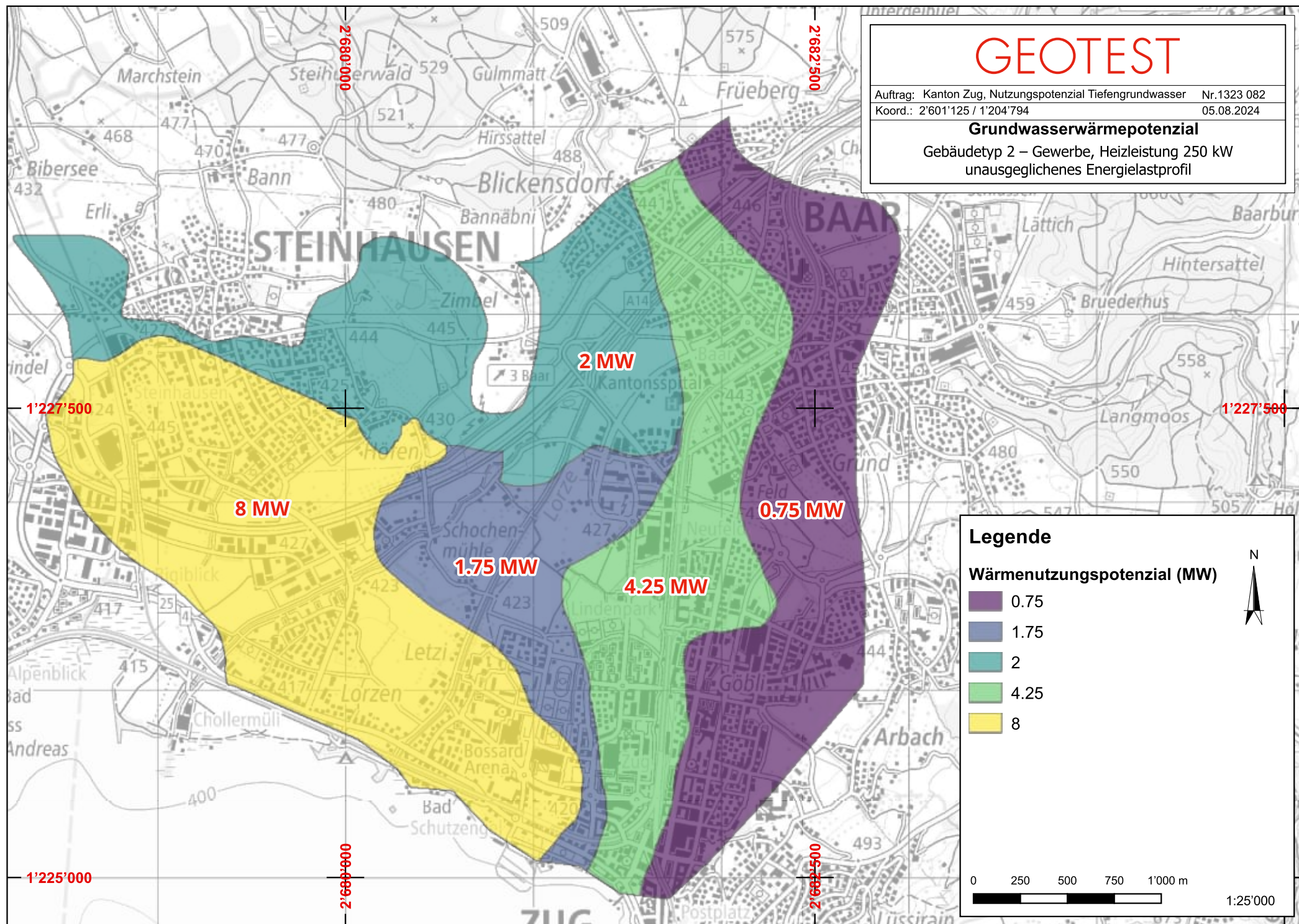


GEOTEST

Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082
Koord.: 2°60'1'25" / 1°20'4'79" 05.08.2024

Grundwasserwärmepotenzial

Gebäudetyp 2 – Gewerbe, Heizleistung 250 kW
unausgeglichenes Energielastprofil



GEOTEST

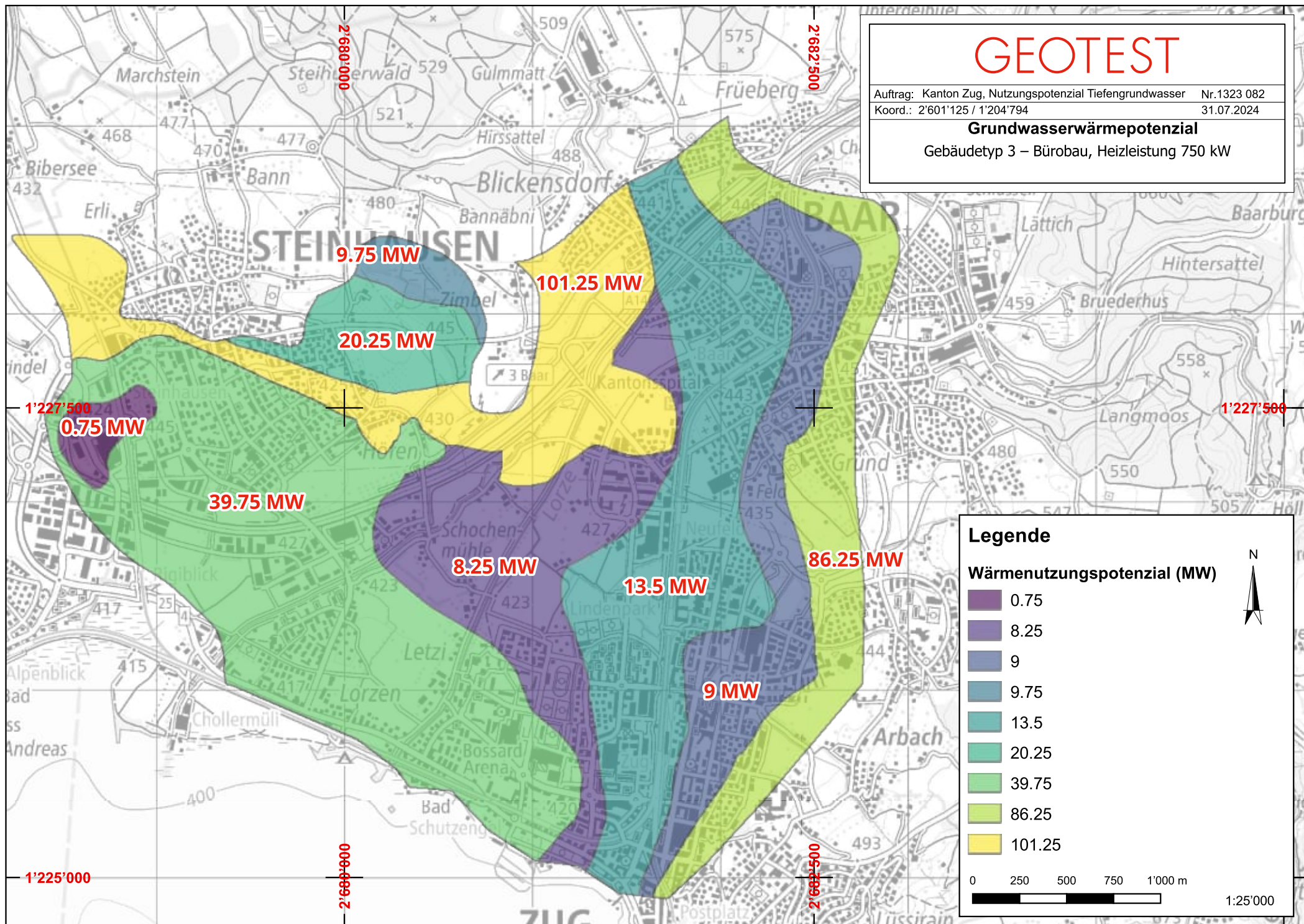
Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082

Koord.: 2'601'125 / 1'204'794

31.07.2024

Grundwasserwärmepotenzial

Gebäudetyp 3 – Bürobau, Heizleistung 750 kW



GEOTEST

Auftrag: Kanton Zug, Nutzungspotenzial Tiefengrundwasser Nr.1323 082
Koord.: 2'601'125 / 1'204'794 05.08.2024

Grundwasserwärmepotenzial

Gebäudetyp 3 – Bürobau, Heizleistung 750 kW
unausgeglichenes Energielastprofil

