

N10 Geothermie Holzkirchen

1. Geologische Situation in Südbayern

Unter der Landschaftsoberfläche im Alpenvorland, die im Quartär von der Eiszeit geprägt wurde, liegen deutlich ältere Gesteinsschichten. Dies sind zunächst die hier einige Kilometer mächtigen Sedimente aus dem Tertiär, welche im süddeutschen Molassebecken abgelagert wurden (Abb. 1).

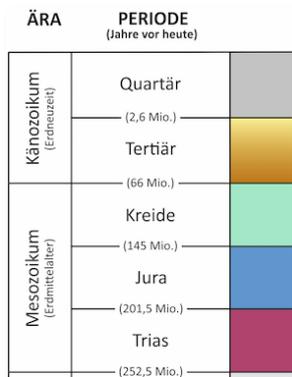


Abb. 1: Erdgeschichtliche Perioden seit dem Erdmittelalter.

Dieses Becken entwickelte sich im Rahmen der Entstehung der Alpen (alpidische Orogenese¹). Diese Gebirgsbildung wurde durch die Kollision der europäischen mit der adriatisch-afrikanischen Kontinentalplatte verursacht. Im Zuge der Kollision wurden Gesteinsdecken verschoben, gefaltet, übereinandergestapelt sowie plastisch und bruchhaft deformiert. Der Prozess der Deckenüberschiebungen und Hebung der Alpen begann bereits in der Kreidezeit, erreichte sein Maximum im Tertiär vor ca. 20 Mio. Jahren und dauert bis zum heutigen Tag an².

Durch die enorme Masse der Krustenverdickung im Kollisionsbereich der Kontinentalplatten wurde die Europäische Platte abgesenkt, am stärksten nahe der Gebirgsfront. Nördlich der Alpen entstand dadurch im Tertiär ein asymmetrisches Vorlandbecken, das sogenannte Molassebecken. Dieses wurde bereits während des Absenkungsvorgangs durch Abtragungsprodukte der sich heraushebenden Alpen aufgefüllt (Abb. 2 und 3).

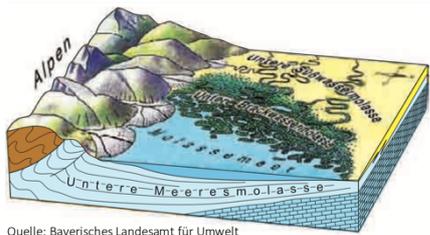


Abb. 2: Auffüllung des Molassebeckens mit Abtragungsschutt aus den Alpen. Dargestellt ist die Situation vor ca. 23 Mio. Jahren (mit Blickrichtung nach Westen). Der Westteil des Beckens war Festland mit Ablagerungen der Unteren Süßwassermolasse, während sich im Osten die Untere Meeresmolasse abgelagerte. Vor 18 Mio. Jahren überflutete das letzte Mal ein Meer das gesamte Molassebecken (Obere Meeresmolasse) und vor ca. 13 Mio. Jahren wurde die Obere Süßwassermolasse unter festländischen Bedingungen abgelagert.

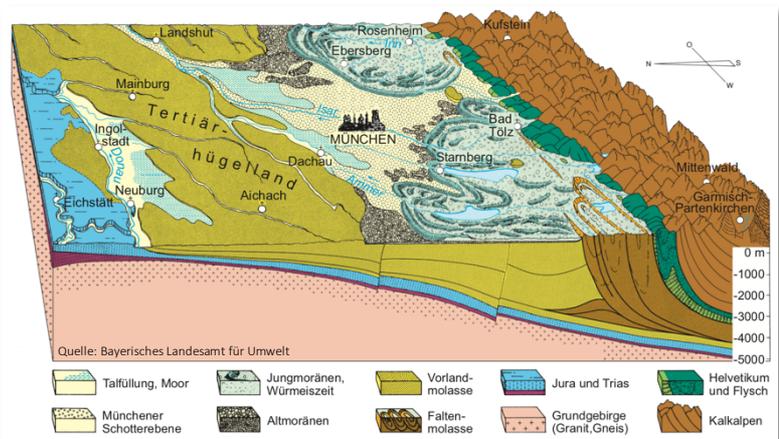


Abb. 3: Die heutige geologische Situation in Südbayern zwischen Donau und Alpen mit Blickrichtung nach Osten. Im Süden des Alpenvorlandes ist die Molasse weitgehend von eiszeitlichen Ablagerungen bedeckt. Zu Tage kommt die Molasse hauptsächlich im Norden des Alpenvorlandes bis an die Donau im sog. „Tertiärhügelland“.

Die Bildung und der Aufbau des Molassebeckens vor 30 – 10 Mio. Jahren im Tertiär ist Voraussetzung für die Existenz eines geothermischen Reservoirs im Süden Bayerns. Die Vorlandmolasse³ tritt im Raum Holzkirchen nur am Taubenberg landschaftsbildend zu Tage. Sie ist dort aber nach Norden abfallend gekippt. Dies kündigt bereits die südlich des Taubenberges beginnende Zone der Faltenmolasse³ an, die sich hier aber noch unter eiszeitlichen Ablagerungen verbirgt.

¹ Orogenese = Gebirgsbildung (griech. *oros* „Berg, Gebirge“, griech. *genesis* „Werden, Entstehen, Genese“)

² Die Alpen heben sich immer noch um 1 bis 2 mm pro Jahr. Als Ursache nimmt man isostatische Ausgleichsbewegungen der Erdkruste an. Da die Erdkruste auf dem verformbaren oberen Erdmantel „schwimmt“, steigt die Erdkruste auf, sobald sie an Gewicht verliert bzw. sinkt ab, wenn sie an Gewicht zunimmt. Da die Alpen durch Abtragung und vor allem durch das Abschmelzen des größten Teiles der kaltzeitlichen Eispanser entlastet wurde, findet nun hier ein „Zurückfedern“ der Erdkruste statt. Lange ging man davon aus, dass die anhaltende Kollision Europas und Afrikas für die aktuelle Hebung hauptverantwortlich ist. Die Tektonik wirkt sich aber im Vergleich zu den oben genannten Ursachen sehr viel weniger aus und kommt vor allem lokal zum Tragen (frei nach Mey et al 2016).

³ Die nach der Ablagerung tektonisch weitgehend unveränderte Molasseschichten nennt man „Vorlandmolasse“. Am Alpenrand wurden die Molasse-Ablagerungen im Zuge der alpinen Orogenese gefaltet, man spricht deshalb bei dieser tektonisch veränderten Molasse von „Faltenmolasse“.

N10 Geothermie Holzkirchen

Unter dem Molassebecken befinden sich Ablagerungen aus dem Erdmittelalter, die in den Kreide- und Jurameeren entstanden sind. Die für die Geothermie in Südbayern wichtigen Weißjurakalke (Malmkalke) befinden sich bei Holzkirchen in ungefähr 5.000 m Tiefe⁴. Sie wurden im Oberjura vor 164 – 145 Mio. Jahren in einem flachen subtropischen Meer abgelagert. Die Malmkalke weisen durch Verkarstung⁵ zahlreiche Hohlräume, Klüfte und Poren auf. Dadurch führt die Malmschicht viel Wasser und tritt im Alpenvorland in der Tiefe als großräumiger Aquifer (Grundwasserleiter) in Erscheinung. Speziell die dolomitisierten Massenkalken, die aus ehemaligen Schwammriffen oder Kalksandsteinen entstanden sind, fungieren hier als Speichergestein für das Thermalwasser.

Die Geothermie nutzt den natürlichen Temperaturanstieg in der Erdkruste mit zunehmender Tiefe. Der mittlere geothermische Gradient liegt in Deutschland - wie auch im Raum Holzkirchen - bei ca. 3 °C pro 100 m Tiefe. Dadurch wird neben dem Gestein auch das in Rissen und Hohlräumen befindliche Wasser erwärmt. Da im Raum Holzkirchen der Malm-Aquifer in großer Tiefe liegt, hat das darin zirkulierende Wasser entsprechend hohe Temperaturen von 150 bis 160 °C.

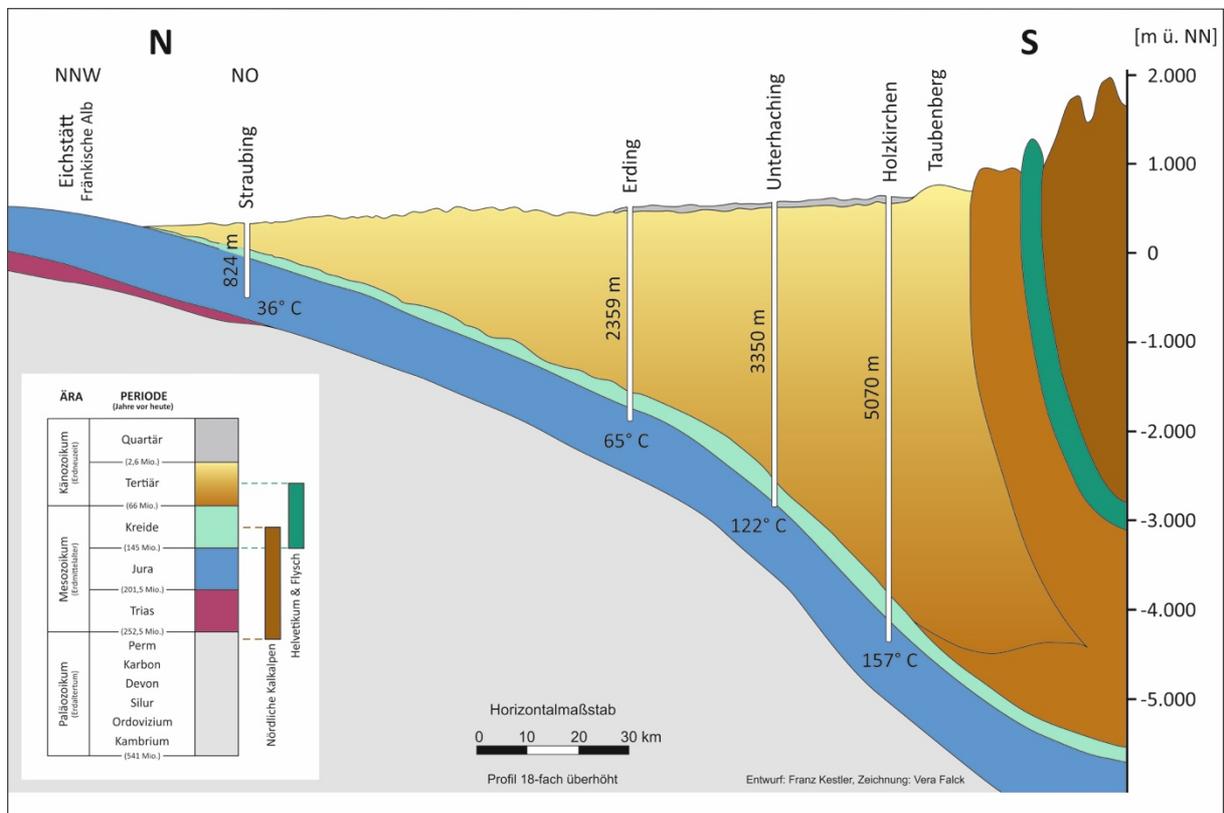


Abb. 4: Der Anstieg der etwa 500 m mächtigen grundwasserführenden Malmgesteine (in der Abbildung blau) vom Alpenrand nach Norden. In der schwäbischen und fränkischen Alb erreichen diese die Erdoberfläche. Eingezeichnet sind für eine Auswahl weiterer Geothermie-Projekte im Alpenvorland die Bohrtiefen und die Temperatur des erbohrten Thermalwassers.

Die etwa 500 m mächtige Malmschicht steigt vom Alpenrand in Richtung Norden kontinuierlich an und erreicht nördlich der Donau als Schwäbisch-Fränkische Alb die Erdoberfläche. Das bedeutet für nördlicher gelegene Erdwärmeprojekte einerseits geringere Bohrtiefen, andererseits aber niedrigere Thermalwassertemperaturen (Abb. 4). Für Fernwärme oder balneologische⁶ Zwecke sind bereits auch niedrigere Thermalwassertemperaturen ausreichend. Für eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Stromerzeugung ist jedoch eine Wassertemperatur von mindestens 120 °C erforderlich.

⁴ Ab 400 m Tiefe spricht man von „Tiefengeothermie“ im Gegensatz zur „oberflächennahen Geothermie“.

⁵ Verkarstung: Lösungsformen (Korrosionsformen) in stark löslichen Gesteinen wie Kalk oder Marmor. Die Bezeichnung „Karst“ geht zurück auf den Namen eines Gebirges im NO von Triest (slow. kraš/ kro. krš = steinig und unfruchtbarer Boden).

⁶ Balneologie: Verwendung des Wassers für Heil- bzw. Thermalbäder.

N10 Geothermie Holzkirchen

2. Entscheidungsprozess für die Geothermie

Die Marktgemeinde Holzkirchen hat sich im Jahr 2006 auf Initiative des damaligen Bürgermeisters Josef Höß zunächst die Aufsuchungs- und anschließend die Nutzungsrechte für den „Erdwärme-Claim“ Holzkirchen mit rund 126 km² gesichert (Abb. 5). Auf rund 65 km² dieses „Claims“ fanden im Jahr 2011

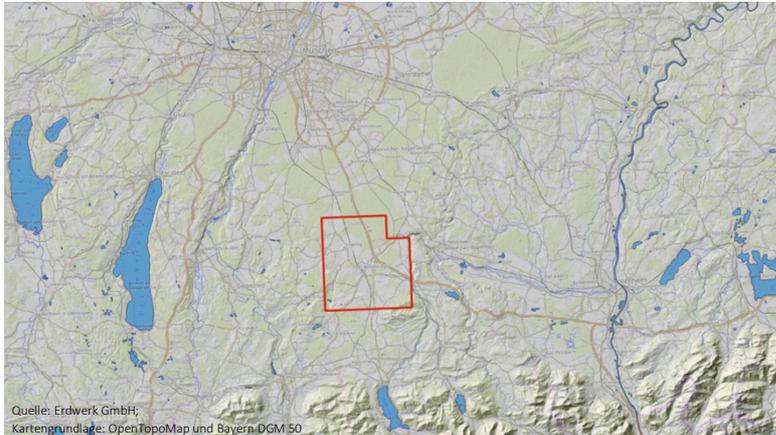


Abb. 5: Lage des bergrechtlichen Bewilligungsfelds "Erdwärme Holzkirchen". Die Markt-gemeinde Holzkirchen ist seit 2006 alleiniger Besitzer dieses „Erdwärme-Claims“.

mit Hilfe von Vibrations-fahrzeugen⁷ und mehreren kilo-meterlangen Geophonketten⁸ 3D-seismische Untersuchungen statt (Abb. 6). Damit wurde ein recht genaues Bild von den geologischen Strukturen im Untergrund von Holzkirchen samt Umgebung erstellt. Als Ergebnis der Untersuchung wurden für das Malmgestein potenziell günstige Bedingungen für eine ausreichende Menge an Thermalwasser prognostiziert.

Im Jahr 2012 wurde dann entschieden, die Geothermie zu realisieren. Zunächst war eine "große" Dubletten⁹-Erschließung ausgehend von zwei verschiedenen Bohrstandorten geplant. Dabei waren Schüttungsraten von über 100 Liter pro Sekunde avisiert. Die Kosten wurden auf 70 Millionen Euro kalkuliert. Wegen der Novellierung des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) von 2013 bis 2014 musste das alte Konzept verworfen und Alternativen geprüft werden. Bei der nun neu favorisierten kleineren Variante wurden unter

anderem die Bohrdurch-messer reduziert und beide Bohrungen sollten nunmehr an nur einem Standort (Alte Au) realisiert werden. Dazu musste das Thermal-wasserreservoir mittels abgelenkter Bohrungs-verläufe erschlossen werden. So verringerten sich die kalkulierten



Abb. 6: Vibrationsfahrzeuge zur Erzeugung von seismischen Wellen, um die strukturellen Verhältnisse des geologischen Untergrundes zu untersuchen.

Kosten gegenüber dem ursprünglichen Konzept um 30 Millionen Euro auf nunmehr 40 Millionen Euro. Bei der "kleineren" Variante konnten nur geringere Schüttungsraten von maximal 80 Litern pro Sekunde technisch realisiert werden und der Fokus richtete sich nun auf die Wärmeversorgung, untergeordnet gekoppelt mit einer Stromproduktion. Am 30. April 2015 entschieden sich die Holzkirchner Marktgemeinderäte in einer öffentlichen Sondersitzung mit einer deutlichen Mehrheit von 17 zu 8 Stimmen für die Umsetzung des neuen Konzepts des kommunalen Geothermie-Projekts.

⁷ Vibrationsfahrzeuge erzeugen seismische Wellen, die in den Untergrund eindringen und an Schichtgrenzen oder Störungzonen des Gesteins reflektiert werden.

⁸ Geophonketten sind hochempfindliche Empfangseinheiten, die reflektierte Wellen aus dem Untergrund empfangen und sammeln.

⁹ Eine geothermische Dublette besteht aus zwei Bohrungen, nämlich der Förderbohrung zur Wasserentnahme sowie der Injektionsbohrung (auch Reinjektionsbohrung oder Schluckbohrung) zur Rückführung des abgekühlten Thermalwassers in die grundwasserführende Gesteinsschicht.

N10 Geothermie Holzkirchen

3. Bau und Betrieb

Nach der Entscheidung des Marktgemeinderats im April 2015 wurde ab Herbst 2015 der Bohrplatz in der Alten Au vorbereitet. Im Januar 2016 begannen die Bohrarbeiten¹⁰ und im Juni desselben Jahres ergaben Pumpversuche die Fündigkeit der ersten Bohrung¹¹ (Abb. 7). Im März 2017 wurde auch die zweite Bohrung fündig, so dass im Sommer 2017 mit dem Bau des Heiz- und Stromkraftwerks begonnen werden konnte. Im Dezember 2018 startete die Fernwärmeversorgung und im Juli 2019 die Stromproduktion.

Das 157 °C heiße Thermalwasser steigt über die 5.078 m tiefe und 6.084 m lange Förderbohrung durch den natürlich vorhandenen Druck im Malm-Aquifer bis zirka 200 bis 300 m unter die Geländeoberfläche auf. Von dort wird es mit Pumpen weiter nach oben gefördert. Die Förderrate beträgt etwa 60 Liter pro Sekunde.

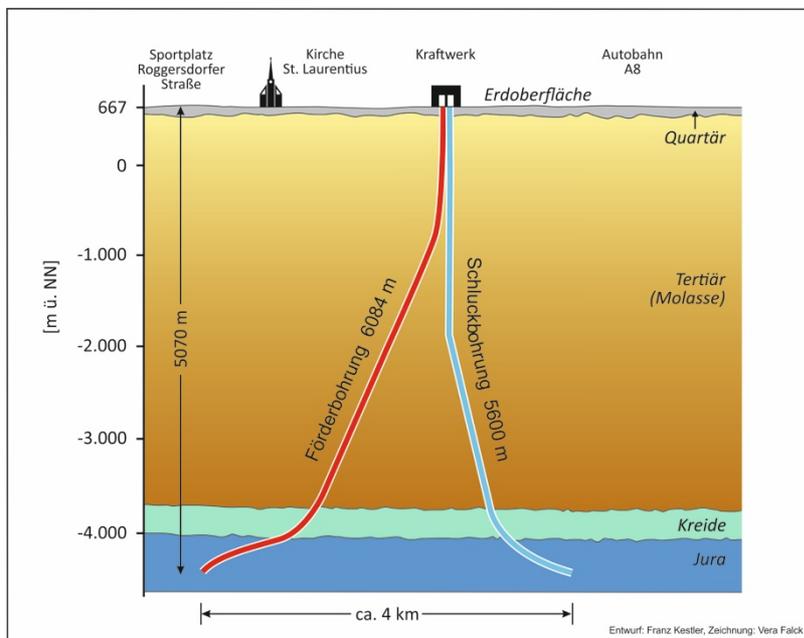


Abb. 8: Querschnitt der hydrothermalen Dublette der Holzkirchner Geothermie. Die 6.084 m lange Förderbohrung wurde soweit abgelenkt, dass die Entnahmestelle des Thermalwassers in 5 km Tiefe ungefähr unter dem Sportplatz an der Roggersdorfer Straße in Holzkirchen liegt. Die 5.600 m lange Reinjektionsbohrung (Schluckbohrung) wurde in Richtung Autobahn A8 abgelenkt. Das abgekühlte Wasser muss in denselben Aquifer (Tiefengrundwasserleiter) zurückgegeben (injiziert) werden, aus dem es entnommen wurde, damit die Massenbilanz ausgeglichen bleibt. Der große Abstand zwischen Förder- und Reinjektionsbohrung in der Tiefe soll gewährleisten, dass sich das abgekühlte Wasser nicht direkt mit dem „Warmwasser“ an der Förderbohrung vermischt. So kann sich das abgekühlte Wasser beim Durchströmen des Gesteins wieder aufheizen, bevor es eventuell wieder die Förderbohrung erreicht.

geschlossen, womit dem Untergrund in der Summe kein Wasser entzogen wird.

Bei der Geothermie Holzkirchen handelt es sich um eine der tiefsten hydrothermalen Bohrungen in Europa und um das heißeste geförderte Thermalwasser in Bayern.



Abb. 7: Bohrturm beim Pumpversuch

Die Energie des heißen Wassers wird über Wärmetauscher auf die Kreisläufe von Heiz- und Stromkraftwerk übertragen. Die maximale thermische Leistung beträgt 22 MW, die maximale elektrische Leistung 4,4 MW. Die Wärmekapazität reicht für 7.500 Haushalte, die Stromkapazität für 5.000 Haushalte. Nach der thermischen Nutzung wird das auf 36 °C abgekühlte Thermalwasser über die 5.070 m tiefe und 5.600 m lange Reinjektionsbohrung wieder zurück in den Malm-Aquifer geleitet (Abb. 8). So bleibt der Wasserkreislauf in sich geschlossen.

¹⁰ Der Bohrdurchmesser verringert sich teleskopartig mit zunehmender Tiefe von einem halben Meter an der Oberfläche auf 16 cm am Zielpunkt in ca. 5 km Tiefe.

¹¹ Bei dieser Bohrung wurde im März 2016 in ca. 4.300 m Tiefe unerwartet eine unter hohem Druck stehende Gasblase angebohrt. Das ins Bohrloch strömende Gas wurde an der Oberfläche kontrolliert abgeflackelt. Die Bohrung wurde unten verschlossen. Anschließend wurde weiter oben die Bohrung auf einem abgelenkten Pfad („Sidetrack“) neu angesetzt, um die gasführenden Bereiche zu umgehen. So konnte im Mai 2016 die Zielschicht in 5.070 m Tiefe erreicht werden. Im Juni 2016 zeigten Pumpversuche die Fündigkeit der Bohrung.

N10 Geothermie Holzkirchen

4. Erneuerbare Energien und Nachhaltigkeit

Die Geothermie gehört zu den erneuerbaren Energien, die im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern wie Öl, Kohle und Gas nicht auf endliche Ressourcen zurückgreifen. Erneuerbare Energien sind ein wichtiger Beitrag zur Nachhaltigkeit¹². Neben der Erdwärme zählen vor allem die Wasserkraft, Biomasse, Sonnen- und Windenergie dazu.

Der große Vorteil der Geothermie im Vergleich zur Sonnen- und Windenergie ist eine tages- und jahreszeit- sowie witterungsunabhängige Energiegewinnung. Auch der Flächenverbrauch und der Eingriff in das Landschaftsbild sind vergleichsweise gering. Der Beitrag der Geothermie zur Energieversorgung in Deutschland ist bezüglich der Wärmeerzeugung bedeutender als bei der Stromerzeugung (Abb. 9 und 10).

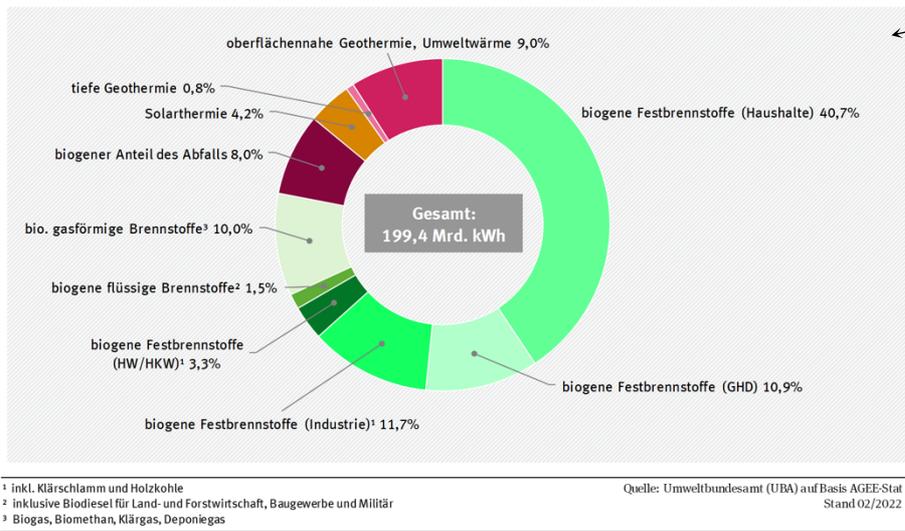
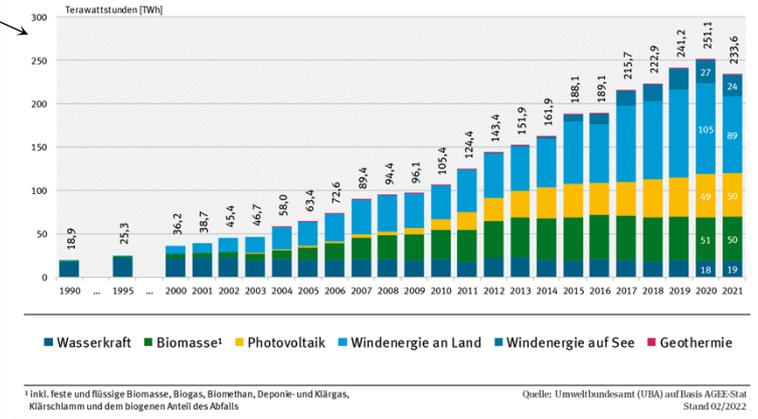


Abb. 9: Wärme aus erneuerbarer Energie in Deutschland (2021). Der größte Anteil wird durch die verschiedenen Formen der Biomasse erzeugt. Aus der tiefen Geothermie stammen 0,8 % und von der oberflächennahen Geothermie 9 % der erneuerbaren Wärmeversorgung. Allerdings macht die Wärmeerzeugung aus allen erneuerbaren Energien zusammen bisher nur etwa 16,5 % des gesamten Wärmeenergieverbrauchs in Deutschland aus. Der übrige Bedarf wird hauptsächlich noch mit fossilen Energieträgern gedeckt.

Abb. 10: Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von 1990 bis 2021 in Deutschland. Der Anteil der tiefen Geothermie betrug 2021 nur 0,08 %. Etwa die Hälfte des Stroms aus erneuerbaren Energien stammt von Windkraftwerken. Die Stromerzeugung aus allen erneuerbaren Energien zusammen deckte 2020 45,2 % und 2021 41,1 % des gesamten Strombedarfs in Deutschland. Der Rückgang 2021 im Vergleich zum Vorjahr ist auf ungünstige Witterung zurückzuführen. Trotzdem ist die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern weiterhin höher als die Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern (Kohle, Gas und Öl).



Die erneuerbaren Energien verringern die Abhängigkeit von Energieimporten und sind eine klimafreundliche Alternative zur fossilen Energie. So können etwa durch die Geothermie Holzkirchen pro Jahr rund 10.000 Tonnen des klimaschädlichen Kohlendioxids eingespart werden.

Stand: Dezember 2022
 Franz Kestler, Klaus Dorsch und Albert Götz

¹² Der Begriff „Nachhaltigkeit“ stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft und beschreibt schon im 18. Jahrhundert das Prinzip, bei dem nicht mehr Holz geerntet wird, als jeweils wieder nachwachsen kann. Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung („sustainable development“) wurde 1987 im sog. „Brundtland-Bericht“ auf die künftige Entwicklung der gesamten Erde übertragen und folgendermaßen definiert: Eine nachhaltige Entwicklung „entspricht den Bedürfnissen der heutigen Generation, ohne die Möglichkeit künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen“ (World Commission on Environment and Development WCED 1987).