

Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW

Teil 4 - Geothermie

LANUV-Fachbericht 40



Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW

Teil 4 - Geothermie

LANUV-Fachbericht 40

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2015

IMPRESSUM

Herausgeber

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen (LANUV)
Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
Telefax 02361 305-3215
E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de

Der Teil 4 des Fachberichtes 40 entspricht in großen Teilen dem Abschlussbericht einer Studie, die durch das internationale Geothermiezentrum der Hochschule Bochum, Lennerhofstraße 140, 44801 Bochum, im Auftrag des LANUV erstellt wurde.

Autoren

Prof. Dr. Rolf Bracke
Prof. Dr. Walter Rocholl
Prof. Dr. Benno Schmidt,
Dipl.-Geophys. Gregor Bussmann
Timm Eicker, M.Sc.
Dipl.-Ing. (FH) Bettina Kelz

Projektbetreuung/Redaktion

Klaus Vogel, Dr. Barbara Köllner (LANUV)

Topografische Karten/Luftbilder

Geobasisdaten des Landes NRW © Geobasis NRW

Fotos

Windenergie, Solarenergie, Bioenergie, Geothermie, Wasserkraft
von links: ©Panthermedia (T. Knauer, J. Schmalenberger, D. Grasse),
L. Thien (EnergieAgentur.NRW), B. Mehlig (LANUV)

ISSN

1864-3930 LANUV-Fachberichte

Informationsdienste

Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter
• www.lanuv.nrw.de

Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im
• WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179

Bereitschaftsdienst

Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV
(24-Std.-Dienst): Telefon 0201 714488

Vorwort

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

als Energie- und Industrieland Nr. 1 hat Nordrhein-Westfalen eine besondere Verantwortung für das Gelingen der Energiewende. Deshalb hat die Landesregierung bereits heute mit dem Klimaschutzgesetz, dem KlimaschutzStartProgramm und dem Klimaschutzplan zahlreiche Initiativen zur Verminderung des CO₂-Ausstoßes auf den Weg gebracht.

Mit dem Ziel, die Potenziale für den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Nordrhein-Westfalen zu ermitteln hat das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW das LANUV mit der Durchführung der „Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW“ beauftragt.

Die Ergebnisse der Potenzialstudien „Wind“ und „Sonne“ zeigen, dass in Nordrhein-Westfalen noch erhebliche Ausbaupotenziale zur Produktion von Strom aus Erneuerbaren Energien bestehen. Allerdings geht es bei der Energiewende um weit mehr als um eine reine Stromwende! Daher hat das LANUV mit der Potenzialstudie „Bioenergie“ die Brücke zu der regenerativen Erzeugung von Wärme geschlagen.

Mit der vorliegenden Potenzialstudie „Geothermie“ gehen wir noch einen Schritt weiter und zeigen, dass die Wärmeversorgung der Gebäude in NRW – auch bei Berücksichtigung strenger Auflagen an den Umwelt- und Naturschutz - zu mehr als die Hälfte über die Nutzung der oberflächennahen Geothermie gedeckt werden kann. Genau wie die Biomasse kann die Geothermie so zur Verstärkung des Erneuerbare-Energien-Angebots beitragen.

Zusammen mit den Potenzialstudien zu Wind-, Solarenergie und Biomasse bietet der vorliegende Fachbericht eine Reihe wichtiger Erkenntnisse für zukünftige Weichenstellungen im Ausbau der Erneuerbaren Energien. Das Bild der Möglichkeiten und Grenzen in NRW wird damit weiter vervollständigt. Der Öffentlichkeit werden die Ergebnisse sowie wichtige Datengrundlagen und Karten im Fachinformationssystem Energieatlas NRW (www.energieatlasnrw.de) zur Verfügung gestellt.

Ich bedanke mich bei allen Beteiligten, die zur Erstellung dieser Studie mit ihrem Fachwissen beigetragen haben und wünsche eine informative Lektüre,

Ihr



Dr. Thomas Delschen

Präsident des Landesamtes für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
Zusammenfassung	10
1. Einleitung	12
1.1. Veranlassung und Ziel.....	12
1.2. Allgemeine Vorgehensweise.....	12
1.3. Anlagenbestand	13
2. Nutzung der oberflächennahen Geothermie	14
3. Ermittlung nutzbarer Flächen	17
3.1. Bebaute Besitzeinheiten	17
3.1.1. Verarbeitungsschritte	17
3.1.2. Gebäudenutzung (Bestandsimmobilien)	21
3.1.3. Neubaugebiete	22
3.2. Ermittlung bestehender Flächenrestriktionen	23
3.2.1. Restriktionen durch Wasserschutz- und Heilquellenschutzgebiete und generelle Anforderungen des Grundwasserschutzes	23
3.2.2. Weitere Restriktionsflächen	26
3.3. Verschneiden der Flächeninformationen	28
4. Ermittlung der theoretisch nutzbaren geothermischen Potenziale	29
4.1. Geothermisches Regime im oberflächennahen Untergrund.....	29
4.1.1. Wärmeleitfähigkeit.....	29
4.1.2. Spezifische Wärmekapazität.....	31
4.1.3. Erdreichtemperatur.....	31
4.2. Lastverteilung über das Jahr	33
4.3. Geothermisches Reservoirvolumen	34
4.3.1. Sondentiefe	34
4.3.2. Theoretisch nutzbare Fläche für Erdwärmesonden	34
4.4. Simulationsberechnungen.....	37
4.4.1. Simulationssoftware	37
4.4.2. Eingabestandards	37
4.5. Simulationsergebnisse	40
5. Ermittlung Gebäudebedarfswerte	42
5.1. Wärmebedarf Wohngebäude	42
5.2. Wärmebedarf Nicht-Wohngebäude.....	44
5.3. Wärmebedarf von Gebäuden mit gesonderter Nutzung	45
5.4. Klimatischer Einfluss auf den Wärmebedarf	45

5.5.	Umrechnung Bruttogebäudevolumen – Beheizte Fläche	46
5.6.	Verteilung Wärmebedarf	46
5.7.	Ergebnis Wärmebedarf	47
6.	Ermittlung des technisch nutzbaren geothermischen Potenzials	50
6.1.	Ergebnisse auf Ebene der Verwaltungseinheiten	52
6.1.1.	Gemeinden	52
6.1.2.	Kreise	54
6.1.3.	NRW	56
6.2.	Szenarienbetrachtung	56
6.3.	Potenzial für Neubauten.....	59
7.	Zusammenfassende Einschätzung der Ergebnisse	60
8.	Literatur	62
Anhang 1:	Sondenfeldkonfigurationen	64
Anhang 2:	Aggregierte Daten auf Gemeindeebene	65
Anhang 3:	Aggregierte Daten auf Kreisebene.....	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung oberflächennaher geothermischer Nutzungsvarianten (Bracke, 2008)	14
Abbildung 2:	Beispiel Stadt Essen: Flurstücke und Gebäude.....	18
Abbildung 3:	Beispiel Stadt Essen: bebaute Besitzeinheiten.....	19
Abbildung 4:	Beispiel Stadt Essen: Bebaute Besitzeinheiten ohne Gebäude- und Verkehrsflächen (unbebaute Fläche der bebauten Besitzeinheiten) (Luftbild: Esri).....	19
Abbildung 5:	Beispiel Ascheberg-Herbern: Bebaute Besitzeinheiten ohne Gebäude- und Verkehrsfläche (unbebaute Fläche der bebauten Besitzeinheiten) (Luftbild: Esri) .	20
Abbildung 6:	Schutzonen (WSG und HSG) I und II sowie III, IIIa, IIIb und IIIc.....	25
Abbildung 7:	Auszug aus der Standortbeurteilungskarte („Ampelkarte“) für den Einbau und Betrieb von Erdwärmesonden (GD NRW).....	27
Abbildung 8:	Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten im Land NRW (GD NRW 2013); Die Darstellung erfolgt ausschließlich für Flächen, auf denen eine geothermische Nutzung möglich ist.....	30
Abbildung 9:	Jahresmitteltemperatur in NRW im Zeitraum 1981 – 2010 (LANUV NRW, 2013)...	32
Abbildung 10:	Vereinfachung der Grundstücksgeometrie(Kartengrundlage: Geobasis.NRW).....	35
Abbildung 11:	Sondenanordnung für eine Einzelsonde bzw. ein Sondenfeld mit 4 Sonden.....	35
Abbildung 12:	Sondenanordnungen bei verschiedenen Reihenhausbebauungen.....	36
Abbildung 13:	Querschnitt der Erdsonde und des Ringraums des Bohrloches.....	37
Abbildung 14:	Minimale Vor- und Rücklauftemperaturen und nutzbarer Temperaturbereich bei unterschiedlichen Vorgaben.....	39
Abbildung 15:	Mittlere Soletemperaturen über den gesamten Simulationszeitraum (50 Jahre)....	41
Abbildung 16:	Vollbenutzungsstunden für unterschiedliche Dämmstandards von Gebäuden (Eicker, 2010).....	43
Abbildung 17:	Prozentuale Verteilung des Heizwärmebedarfs über das Jahr unterschiedlicher Dämmstandards von Gebäuden (Eicker, 2010).....	47
Abbildung 18:	Wärmebedarf der Gemeinden.....	48
Abbildung 19:	Wärmebedarf pro Einwohner (Kreisebene).....	49
Abbildung 20:	GIS-gestützte Verarbeitungsschritte zur Ermittlung der bebauten Eigentumsflächen mit Bedarfs- und Ertragsinformation.....	50
Abbildung 21:	Darstellung des Wärmebedarfs der Gebäude (in MWh/a) und der Besitzeinheiten sowie der prozentualen Abdeckung durch das vorhandene geothermische Potenzial (Luftbild: Esri).....	51
Abbildung 22:	Technisch nutzbares geothermisches Potenzial für die Gemeinden (Szenario A)..	52
Abbildung 23:	Prozentualer Deckungsanteil für die Gemeinden (Szenario A).....	53
Abbildung 24:	Technisch nutzbares geothermisches Potenzial für die Kreise (Szenario A).....	54
Abbildung 25:	Prozentualer Deckungsanteil für die Kreise (Szenario A).....	55
Abbildung 26:	Verringerung des geothermischen Potenzials auf Gemeindeebene (Szenario B)...	57
Abbildung 27:	Verringerung des geothermischen Potenzials auf Kreisebene (Szenario B).....	58
Abbildung 28:	Potenzial der Neubauten auf Gemeindeebene.....	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Größenklassen bebauter Besitzstücke im Land NRW	20
Tabelle 2:	Klassifizierung nach Nutzungsgruppen	21
Tabelle 3:	Wärmebedarf Neubauten	22
Tabelle 4:	Geothermisch nutzbare Flächen im Land NRW	28
Tabelle 5:	Vollbenutzungsstunden (s. Kapitel 5)	33
Tabelle 6:	Eingabestandards für die Wärmeträgerfluide	39
Tabelle 7:	Vollbenutzungsstunden für verschiedene Gebäudenutzungen	43
Tabelle 8:	Parameter für Wohngebäude	44
Tabelle 9:	Parameter für Nicht-Wohngebäude	44
Tabelle 10:	Parameter für Gebäude mit sehr hohem Wärmebedarf	45
Tabelle 11:	Parameter für Gebäude mit geringem Wärmebedarf	45
Tabelle 12:	Gesamtbetrachtung der Regierungsbezirke und ganz NRW	56

Abkürzungsverzeichnis

ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
EED	Earth Energy Designer (Simulationsprogramm)
EWS	Erdwärmesonden
EnEV	Energieeinsparverordnung
FKZ	Flurstückskennzeichen
GD	Geologischer Dienst
GIS	Geo-Informationssystem
GZB	Internationales Geothermiezentrum
HDPE	High Density Polyethylen
ISO	International Organization for Standardization
IT.NRW	Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
LOD	Level of Detail (Detaillierungsstufe)
NRW	Nordrhein-Westfalen
OGC	Open Geospatial Consortium
OS	Objektschlüssel
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
UTM	Universal Transverse Mercator (Geokoordinatensystem)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WLF	Wärmeleitfähigkeit
WSchV	Wärmeschutzverordnung
WSG	Wasserschutzgebiet

Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Potenzialstudie Geothermie NRW hat das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) im Auftrag des Klimaschutzministeriums NRW (MKULNV) die Potenziale der oberflächennahen Geothermie in NRW ermittelt. Die Studie beschränkt sich hierbei ausschließlich auf die Nutzung über Erdwärmesonden und einer maximalen Erschließungstiefe von 100 m. Im Unterschied zur bereits vorliegenden geothermischen Potenzialkarte des Geologischen Dienstes NRW (GD NRW) wurden die geothermischen Potenziale bestimmt, die aufgrund der Wärmeabnehmerstruktur im Land NRW technisch nutzbar sind.

Das technische Potenzial beschreibt das geothermische Potenzial eines Grundstückes, in Abhängigkeit von der geothermischen Ergiebigkeit am jeweiligen Standort, verglichen mit dem Wärmebedarf der Gebäude auf dem zugehörigen Grundstück. Auf der einen Seite ergibt sich die geothermische Ergiebigkeit auf Grundlage des Flächendargebots, der Untergrundeigenschaften, des klimatischen Einflusses und etwaiger Restriktionsbestimmungen. Auf der anderen Seite wird das Gebäude entsprechend seiner Größe und Nutzungsart als Wärmesenke definiert.

Im ersten Bearbeitungsschritt wurden die Flächen innerhalb des Landes Nordrhein-Westfalen ermittelt, auf denen eine Nutzung mittels Erdwärmesonden grundsätzlich möglich ist. Hierbei wurden zunächst auf Grundlage des ALK-Datenbestands gebäude- bzw. grundstücksscharf aus Flächen, die in einem unmittelbaren Zusammenhang mit einem potenziellen Versorgungsobjekt (in der Regel ein Gebäude) stehen, Besitzeinheiten gebildet. Diese wurden um die nicht nutzbaren Flächenanteile wie überbaute Flächen (Gebäude, Verkehrsflächen), Flächen mit Gebäuden ohne Heizbedarf sowie Flächen im Bereich der Wasserschutz-zonen I und II reduziert.

Im zweiten Schritt wurden für die verbleibenden „Netto-Besitzeinheiten“ die theoretischen geothermischen Potenziale ermittelt, wobei Nutzungsbeschränkungen im Bereich hydrogeologisch kritischer Bereiche sowie innerhalb der Wasserschutz-zonen III, IIIa, IIIb, IIIc berücksichtigt wurden. Für Letzteres wurden aufgrund der inhomogenen Genehmigungspraxis zwei Varianten betrachtet: Szenario A mit Tiefenbegrenzung von 40 m und Wasser als Soleflüssigkeit sowie Szenario B mit einem vollständigen Nutzungsausschluss. Mittels entsprechender Auslegungsberechnungen wurde für jede Besitzeinheit auf Grundlage der seitens des Geologischen Dienstes NRW bereitgestellten Wärmeleitfähigkeitsdaten des Untergrundes, der Untergrundtemperaturen, der nutzbaren Grundstücksfläche sowie weiteren mit der begleitenden Projektgruppe abgestimmten Randbedingungen das theoretisch nutzbare geothermische Potenzial für beide o.g. Varianten bestimmt.

Im dritten Bearbeitungsschritt wurde aufgrund der vorliegenden Gebäudedaten/-geometrien und den standortspezifischen Klimabedingungen über einen pauschalen Ansatz der jeweilige Wärmebedarf gebäudescharf berechnet.

Die Ermittlung des technisch nutzbaren geothermischen Potenzials erfolgte daraufhin mittels der Verschneidung des Wärmebedarfs der Gebäude und des theoretisch nutzbaren geothermischen Potenzials. Die Ergebnisse wurden auf den Ebenen Gemeinde, Kreis, Regierungsbezirk und Land NRW aggregiert. Für jede dieser Ebenen wurde das technisch nutzbare geothermische Potenzial und der prozentuale Deckungsanteil am entsprechenden Wärmebedarf ausgegeben. Um auch die Neubauaktivitäten berücksichtigen zu können, wurde auf Grundlage von Statistiken über die Baufertigstellungen (IT.NRW) ein gemeinschaftsweit ermittelter Neubauanteil berechnet.

Für NRW ergibt die Aggregation der mehr als 3,6 Millionen relevanten Besitzstücke einen Wärmebedarf von 271,1TWh/a. Hiervon können bei einem technisch nutzbaren geothermischen Potenzial von 153,7 TWh/a anteilig 56,7 % des Wärmebedarfs geothermisch gedeckt werden (Szenario A). Bei Ausschluss der Wasserschutzzone III, IIIa, IIIb, IIIc für die geothermische Nutzung reduziert sich die anteilige Versorgung auf 52,1 %, bei einem technisch nutzbaren geothermischen Potenzial von 141,3 TWh/a (Szenario B). Zudem konnte ein Neubaupotenzial von 426 GWh/a ermittelt werden.

NRW-weit sind sehr große Unterschiede im geothermisch möglichen Deckungsanteil festzustellen. Die Unterschiede sind in zahlreichen Ursachen begründet. Hierzu zählen insbesondere die Bebauungsdichte, der Flächenanteil der Restriktionsflächen / Wasserschutzgebiete sowie die geothermischen Parameter wie Wärmeleitfähigkeit und Untergrundtemperatur. Die Bandbreite liegt auf Gemeindeebene zwischen unter 1 % und 97 % Deckungsanteil. Insgesamt gilt, dass die ländlichen, kleinstädtischen Gemeinden i.d.R. aufgrund der geringeren Bebauungsdichte bzw. nutzbaren Freiflächenanteile einen deutlich größeren geothermischen Deckungsanteil aufweisen als Mittel- und Großstädte. Für einige Gemeinden wirkt sich der mögliche Wegfall (Szenario B) der Wasserschutzgebiete der Zonen III, IIIa, IIIb, IIIc für die geothermische Nutzung in Form einer erheblichen Reduzierung des technisch nutzbaren geothermischen Potenzials aus.

Wie bei allen Potenzialstudien müssen die Ergebnisse unter Berücksichtigung der gewählten Randbedingungen und Berechnungsansätze sowie der vorgenommenen Vereinfachungen bzw. Pauschalisierungen interpretiert werden. Als wesentlicher Aspekt ist hier der über pauschale Ansätze berechnete Wärmebedarf zu nennen sowie die gewählten Sondertiefen, Mindestflächengrößen und Restriktionsvorgaben. Dabei führen einige Annahmen, wie z.B. die gewählte Sondertiefe von 100 m, aufgrund der konservativen Betrachtung eher zu einer Unterschätzung der Ergebnisse und einige, wie z.B. der Altbergbau, der aufgrund flächendeckend nicht vorhandener Informationen nicht berücksichtigt werden konnte, zu einer Überschätzung der Ergebnisse. Die Berücksichtigung des Altbergbaus würde vor allem in Städten und Gemeinden im Ruhrgebiet das Potenzial niedriger ausfallen lassen. Zudem können die im Einzelfall zu stellenden Anforderungen zum Schutz des Grundwassers, im Rahmen der Genehmigung durch die zuständige Wasserbehörde, zu einer Reduzierung der technisch nutzbaren Potenziale führen. Andererseits würde auf ganz NRW bezogen die Erhöhung der Sondertiefe, die Betrachtung alternativer Techniken (z.B. Brunnendublettenanlagen, Kollektoren etc.) sowie die Betrachtung der geothermischen Gebäudekühlung, die zu einer Regeneration des Untergrundes im Sommerhalbjahr und somit zu einer Erhöhung der geothermischen Ergiebigkeit im Heizfall (Winter) führen kann, das geothermische Potenzial erhöhen.

1. Einleitung

1.1. Veranlassung und Ziel

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) führt derzeit eine Potenzialstudie zu den Erneuerbaren Energien in Nordrhein-Westfalen durch. Durch fundierte Analysen sollen der aktuelle Bestand an Erneuerbaren Energien sowie umweltverträgliche Potenziale in den Bereichen Wind, Sonne, Biomasse und Geothermie auf regionaler Ebene ermittelt werden. Damit soll u.a. Kommunen, Kreisen und Bezirksregierungen in ihrer jeweiligen Funktion als Genehmigungs- und / oder Planungsbehörde sowie Standortsuchenden und Planern ein Überblick für NRW geschaffen werden. Zudem werden Grundlagendaten zur Unterstützung des weiteren Ausbaus der Erneuerbaren Energien erarbeitet und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Die Potenzialstudie Erneuerbare Energien ist in verschiedene Teilbereiche unterteilt, die separat bearbeitet werden: Windenergie, Sonnenenergie, Bioenergie, Geothermie und Wasserkraft. Für jeden Teilbereich werden drei Ziele verfolgt:

- 1.) Darstellung des derzeitigen Anlagenbestandes
- 2.) Die Ermittlung von machbaren Potenzialen auf den Planungsebenen Nordrhein-Westfalens
- 3.) Bereitstellung von Ergebnissen und Grundlagendaten im Energieatlas NRW

Die Ergebnisse der einzelnen Potenzialstudien fließen im Anschluss an ihre Fertigstellung im digitalen Fachinformationssystem "Energieatlas Nordrhein-Westfalen" zusammen und werden dort der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Neben dem aktuellen Anlagenbestand werden hier die Potenziale für die einzelnen Arten Erneuerbarer Energien übersichtlich dargestellt. Für die einzelnen Verwaltungsebenen ist ablesbar, welche und wie viele Anlagen auf ihrem Gebiet einen wie großen Beitrag zur Deckung des eigenen Energieverbrauchs (Strom und Wärme) leisten. Durch den Vergleich des Bestandes mit den ermittelten Potenzialen können weitere Ausbaupotenziale aufgezeigt werden.

Zusätzlich werden den Planungsebenen und interessierten Standortsuchenden im Energieatlas (Daten-) Grundlagen zur Ausweisung von Flächen und zur Planung von Anlagen bereitgestellt.

1.2. Allgemeine Vorgehensweise

Erdwärme kann auf unterschiedliche Weise erschlossen und genutzt werden. Grundsätzlich unterscheidet man die oberflächennahe Geothermie zum Heizen und Kühlen zumeist mit Unterstützung einer Wärmepumpenanlage sowie die tiefe Geothermie zur direkten Wärmenutzung oder Stromerzeugung.

Im Rahmen der vorliegenden Studie beschränkt sich die Ermittlung der Potenziale auf die oberflächennahe Geothermie (bis 100 m) und hierbei ausschließlich auf die Nutzung von Erdwärmesonden. Letztere sind bereits seit zwei Jahrzehnten in NRW etabliert und haben in NRW einen Anteil an allen oberflächennahen Erdwärmesystemen von mehr als 90 %.

Das Ziel dieser Studie ist die Ermittlung von regionalen und technisch nutzbaren Wärmepotenzialen für den Bereich oberflächennahe Geothermie. Diese technisch nutzbaren Potenziale werden als energetische Potenziale sowie als prozentualer Deckungsanteil am Wärmebedarf dargestellt. Da die Erzeugung von Wärme bei der oberflächennahen Geothermie stets vom Wärmebedarf abhängt, ist der Anteil, wie viel des Wärmebedarfs in NRW über die oberflächennahe Geothermie gedeckt werden kann, eine maßgebende Größe. Die Potenziale werden für jede Gemeinde in NRW einzeln ermittelt und anschließend für die jeweiligen Kreise, Regierungsbezirke und schließlich für das Land NRW aggregiert.

Die Studie wurde von einer projektbegleitenden Arbeitsgruppe mit Vertretern des Geologischen Dienstes NRW, der Unteren Wasserbehörden NRW, der Bergbehörde NRW, der EnergieAgentur.NRW, des Kommunalverbandes Rhein-Ruhr (RVR), der Geothermischen Vereinigung (GTV) und des LANUV (FB 37, FB 52) begleitet. In einem Auftaktgespräch wurde die geplante Vorgehensweise sowie die beabsichtigten Methoden gemeinsam mit allen Beteiligten abgestimmt.

1.3. Anlagenbestand

Abweichend zu den anderen Potenzialstudien des LANUV im Bereich Strom, kann der Anlagenbestand von erdgebundenen Wärmepumpen mit den derzeit vorliegenden Daten nicht vollständig für NRW dargestellt werden. Insbesondere die installierte Leistung ist derzeit nicht flächendeckend für NRW bekannt. Daher kann der Anlagenbestand nur überschlägig dargestellt werden.

Anhand einer Umfrage des LANUV Anfang 2013 ließ sich ein Bestand von etwa 40.000 Anlagen in NRW ermitteln, von denen bei ca. 90 % die Energie über Erdwärmesonden gewonnen wird. In dieser Studie wurden in NRW fast 6.000.000 Gebäude in NRW ermittelt die einen Wärmebedarf aufweisen. Demnach lässt sich feststellen, dass weniger als 1 % der Gebäude in NRW, die einen Wärmebedarf aufweisen, geothermisch versorgt werden.

2. Nutzung der oberflächennahen Geothermie

Die Nutzbarmachung des oberflächennahen geothermischen Potenzials ist mit unterschiedlichen technischen Systemen möglich. Grundsätzlich werden die Systeme in offene und geschlossene Anlagen eingeteilt. Während bei den offenen Anlagen ausschließlich Grundwasserbrunnen zum Einsatz kommen, sind bei den geschlossenen Systemen unterschiedliche Varianten verfügbar. Hierbei wird zwischen Erdwärmesonden, Erdwärmekörpern, Erdwärmekollektoren und erdberührten Betonbauteilen (z.B. Energiepfähle, aktivierte Schlitzwände) unterschieden (vgl. Abb. 1).

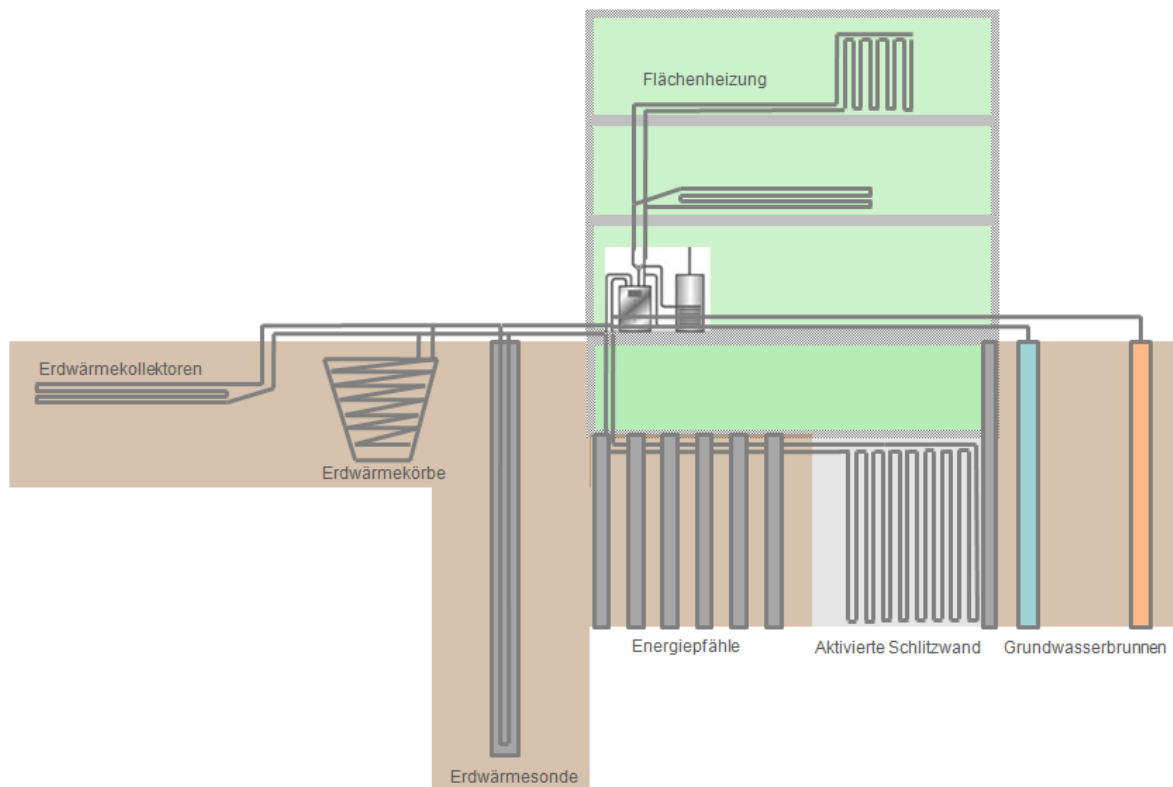


Abbildung 1: Darstellung oberflächennaher geothermischer Nutzungsvarianten (Bracke, 2008)

Die Auswahl der Systeme richtet sich insbesondere nach den örtlichen und baulichen Gegebenheiten. Alle oben genannten Systeme haben eine Gemeinsamkeit: Die dem Erdreich entzogene Energie fällt auf einem geringen Temperaturniveau an ($<15^{\circ}\text{C}$). Der Einsatz zur Direktheizung ist somit nicht möglich, es werden nachgeschaltete Einrichtungen zur Temperaturerhöhung notwendig. Diese Temperaturerhöhung wird meist durch eine Wärmepumpe übernommen, die dann die benötigte Vorlauftemperatur des Heizsystems herstellt. Im Gegensatz zur Direktheizung ist eine Direktkühlung jedoch möglich und kommt im Büro- und Verwaltungsbau immer häufiger zum Einsatz. Auch die Nutzung des Untergrundes als Energiespeicher - d.h. Wärme wird im Sommer in den Untergrund eingespeist und kann im Winter wieder entnommen werden - bekommt eine immer größere Bedeutung.

Oberflächennahe Erdwärmesondensysteme (EWS) sind derzeit die am weitesten verbreitetste oberflächennahe geothermische Erschließungsart in Deutschland (Grimm, 2014). Auch in

NRW ist der Anteil an allen Erdwärmesystemen mit über 90 % sehr hoch. Gründe hierfür sind:

- Der Flächenverbrauch ist deutlich geringer im Vergleich zu Flächenkollektoren und Erdwärmekörpern.
- Der Einsatz auf dem Großteil der Landesfläche (Ausnahme Wasserschutzgebiete und hydrogeologisch und geologisch bedingte Tiefenbeschränkungen) ist möglich.
- EWS können auch in Gebieten ohne Grundwasser bzw. mit geringer Grundwasserergiebigkeit betrieben werden.
- EWS sind nahezu wartungsfrei
- Es handelt sich um eine etablierte Technik
- Es können bei entsprechender Anlagengröße sehr große Energiemengen von bis zu 1.000MWh/a bereitgestellt werden.

In Abhängigkeit von ihrer Definition erreichen oberflächennahe Erdwärmesondensysteme Teufen von wenigen Metern bis zu 400 Metern. Die zu erstellenden Bohrungen werden meist senkrecht abgeteuft. Als geschlossener Wärmetauscher werden in der Regel HDPE-U-Sonden verwendet, die nach Erstellung der Bohrung in das Bohrloch eingebracht und formschlüssig zum anstehenden Gebirge mit einer Bentonit-Zement-Suspension verpresst werden. Durch das Sondensystem zirkuliert ein Wärmeträgermedium. Liegt die Temperatur dieses Mediums bei Sondereintritt unter der Temperatur des erschlossenen Erdreichs, erwärmt es sich bei der Passage durch die Sonde. Somit wird ein nutzbarer Temperaturunterschied zwischen Sondereintritts- und Sondaustrittstemperatur erreicht. Je Meter Sondenlänge lassen sich in den Bandbreiten der geologischen und betrieblichen Randbedingungen des Gesamtsystems durchschnittliche Leistungen von 25 - 100 W (VDI 4640, 2001) entziehen. Werden mehrere oberflächennahe Erdwärmesonden zu einem Sondenfeld zusammengeschaltet, ist eine Versorgung von größeren Objekten bis hin zu kleineren Infrastrukturen mit einem Leistungsbedarf von mehreren hundert Kilowatt möglich.

Übersteigt die Temperatur des Wärmeträgermediums bei Eintritt in die Sonde die Temperatur des Erdreiches, kühlt es bei der Sondenpassage ab. Somit ist es auch möglich, Wärme an das Erdreich abzugeben und eine direkte sommerliche Kühlung herzustellen. Die Sondaustrittstemperatur kann so auf einem möglichst niedrigen Niveau gehalten werden und ein zur Raumtemperatur möglichst hoher Temperaturunterschied der Kühlung dienen.

Oberflächennahe Systeme sind für unterschiedliche Anwendungen, von der dezentralen Einzelversorgung von Einfamilienhäusern bis hin zu mit Sondenfeldern betriebenen Gewerbe- und Infrastrukturprojekten geeignet und im Regelfall an allen geologischen Standorten einsetzbar. Für Industrieanforderungen sind oberflächennahe Erdwärmesonden weniger geeignet, da im Verhältnis zum Bedarf eher geringe Temperaturen und Leistungen erzielt werden.

Die Nutzung oberflächennaher Erdwärme bietet viele Vorteile, da die Erdwärme eine regenerative Energiequelle darstellt und so – den Stromanteil der Wärmepumpe ausgenommen – CO₂-frei ist. Jedoch ist eine Bohrung für die Installation einer Erdwärmesonde teilweise mit Risiken verbunden, so dass eine saubere technische Ausführung stets notwendig ist. Anlagensicherheit und Umweltschutz sind in diesem Zusammenhang zwei Seiten derselben Me-

daille: Die Anforderungen an die Anlagenplanung, standörtliche Prüfung, Qualität der Ausführung und an die Qualifikation des Personals sind notwendige Voraussetzung sowohl für eine dauerhaft mögliche und effiziente Ressourcennutzung als auch für den Schutz der Ressource Grundwasser, dem stets eine hohe Priorität zuzuordnen ist.

Die maßgebliche technische Richtlinie im Bereich der oberflächennahen Geothermie ist die VDI 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes“ (VDI 4640, 2010). Vorgaben zur Nutzung, der technischen Ausgestaltung und der Auslegung von Erdwärmesondenanlagen sind insbesondere dem Blatt 2 „Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen“ der VDI 4640 (VDI 4640, 2001) zu entnehmen. Derzeitig erfolgt eine umfangreiche Überarbeitung der VDI 4640, Blatt 2. Aktuell wird daher in der Praxis von vielen Genehmigungsbehörden und Fachplanern die Schweizer SIA-Norm 384/6 „Erdwärmesonden“ (SIA 384/6, 1996) herangezogen, in die die neuen Erkenntnisse der letzten Jahre eingeflossen sind und die deutlich mehr ins Detail geht.

3. Ermittlung nutzbarer Flächen

Im ersten Bearbeitungsschritt wurden die Flächen innerhalb des Landes Nordrhein-Westfalen ermittelt, auf denen eine Nutzung mittels Erdwärmesonden grundsätzlich möglich ist. Hierbei wurden die gesetzlichen Vorgaben, die eine Nutzung der oberflächennahen Geothermie beeinträchtigen oder verhindern können, beachtet.

3.1. Bebaute Besitzeinheiten

Für die Ermittlung der Flächen, die für eine Nutzung mittels Erdwärmesonden grundsätzlich in Frage kommen, sind alle Flächen, die in einem unmittelbaren Zusammenhang mit einem potenziellen Versorgungsobjekt stehen (in der Regel Gebäude), zu betrachten. Um eine grundstücksscharfe Zuordnung der Versorgungsobjekte zu den geothermischen Nutzflächen zu ermöglichen sind sogenannte "Besitzeinheiten" zu definieren. Bei einer Besitzeinheit handelt es sich um die Flurstücke die eine direkte Gebäude-Bebauung aufweisen, zuzüglich der umgebenden unbebauten Flurstücke, welche die gleichen Besitzverhältnisse aufweisen wie die bebauten Flächen.

Folgende Daten wurden für die Bearbeitung der Studie verwendet:

- Alle Flurstücke in NRW
- Die Relationen zwischen Flurstückskennzeichen (FKZ) und einem Buchungskennzeichen im Liegenschaftsbuch
- Gebäudegrundrisse:
 - Alle Gebäudegrundrisse des Liegenschaftskatasters mit Nutzungskennzeichnung nach dem Liegenschaftskataster
 - Gebäudegrundrisse mit Gebäudehöhen-Angaben für die landesweite LOD1-Darstellung für NRW
- Verwaltungsgrenzen

Diese Daten wurden mit Hilfe eines Geo-Informationssystems (GIS) weiter verarbeitet. Zum Einsatz kam hierfür die Software "Feature Manipulation Engine" (FME). Nachfolgend werden die GIS-Verarbeitungsschritte näher beschrieben.

3.1.1. Verarbeitungsschritte

1. Zunächst wurden Flurstücke mit gleichem Buchungskennzeichen (= gleiche Besitzverhältnisse) und räumlicher Verbindung (=> zusammenhängende Besitzeinheiten) zusammen gefasst.
2. Im Anschluss an diese GIS-Operation wurde der Datenbestand auf Besitzeinheiten mit Gebäuden durch geometrische Überlagerung mit den Gebäudegrundrissen reduziert (d. h., die Besitzeinheiten, auf denen sich keine Gebäude befinden, wurden aus dem Datenbestand entfernt; Resultat sind die "*bebauten Besitzeinheiten*").

3. Zuletzt wurden die Gebäudegrundrisse aus den bebauten Besitzeinheiten geometrisch heraus geschnitten, um die geothermisch nutzbaren Flächen zu erhalten ("*unbebaute Fläche der bebauten Besitzeinheiten*" als Resultat).

Verkehrsflächen wie zum Beispiel Straßen, Wege und Bahngelände bleiben damit unberücksichtigt.

Nachstehende Abbildungen 2 - 5 dienen zur Verdeutlichung des Ablaufs. In Abbildung 2 sind für einen kleinen räumlichen Ausschnitt die Flurstücke (rosafarben) und Gebäudegrundrisse (gelblich) kartografisch dargestellt.

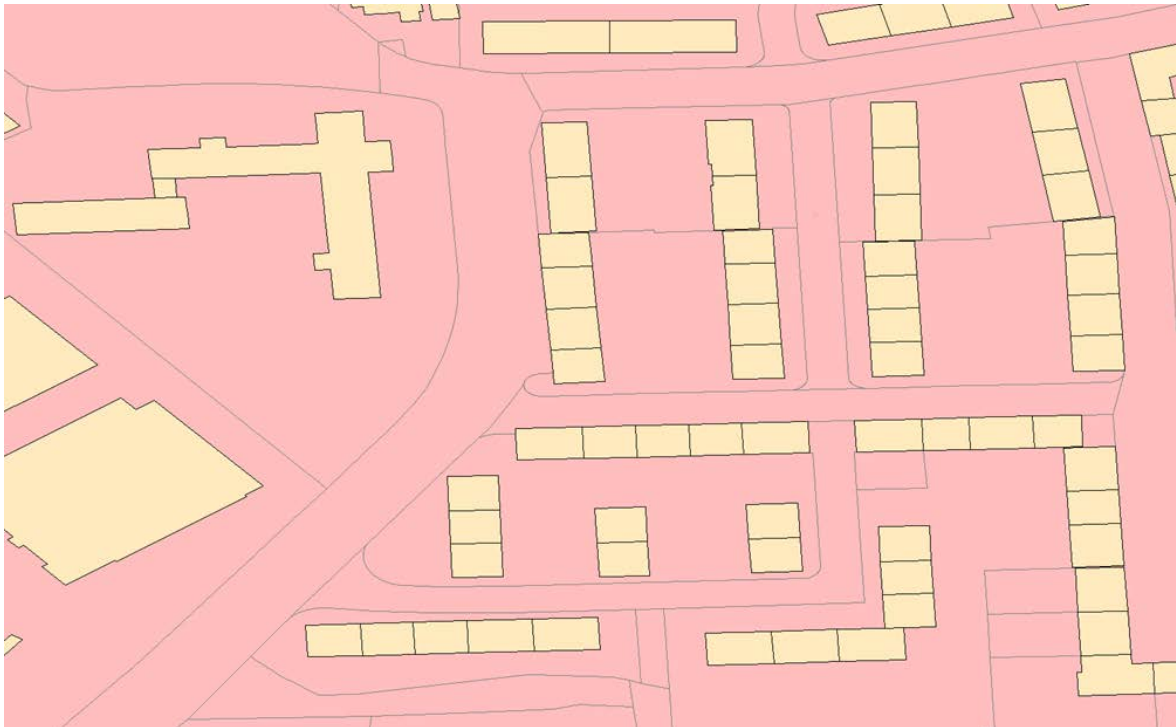


Abbildung 2: Beispiel Stadt Essen: Flurstücke und Gebäude

Die nachfolgende Grafik (Abb. 3) zeigt für den vorherigen Kartenausschnitt die bebauten Besitzeinheiten, wobei unmittelbar benachbarte Flurstücke mit gleichen Eigentumsverhältnissen flächenmäßig zusammengefasst und unbebaute Besitzeinheiten – hier vor allem Straßenflächen - entfernt sind.

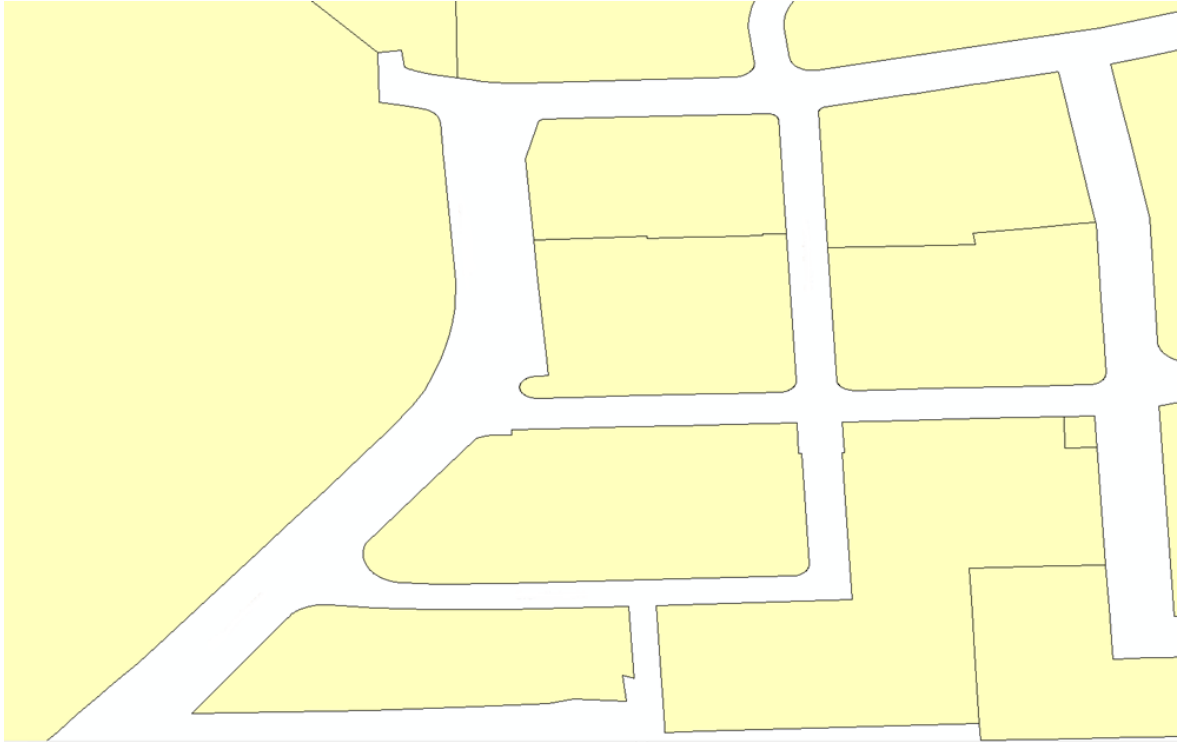


Abbildung 3: Beispiel Stadt Essen: bebaute Besitzeinheiten

In Abbildung 4 sind die bebauten Besitzeinheiten ohne die Gebäudeflächen (unbebaute Fläche der bebauten Besitzeinheiten) dargestellt.



Abbildung 4: Beispiel Stadt Essen: Bebaute Besitzeinheiten ohne Gebäude- und Verkehrsflächen (unbebaute Fläche der bebauten Besitzeinheiten) (Luftbild: Esri)

Der Ausschnitt des Gebiets der Gemeinde Ascheberg in Abbildung 5 soll exemplarisch die möglichen räumlichen Dimensionen von ermittelten bebauten Besitzstücken in Ortsrandla-

gen darstellen. Bezüglich des geothermischen Potenzials bei sehr großen Besitzeinheiten wurde nicht die gesamte Polygonfläche herangezogen, sondern nur der für den Wärmebedarf der Bebauung benötigte Anteil des Potenzials.

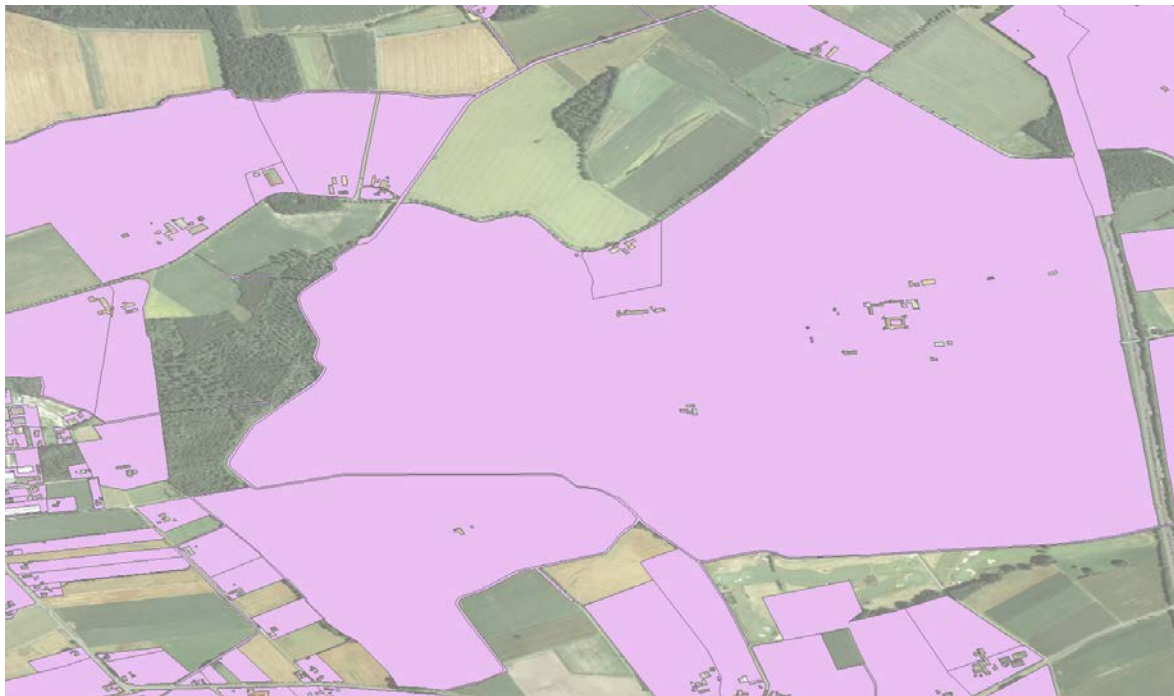


Abbildung 5: Beispiel Ascheberg-Herbern: Bebaute Besitzeinheiten ohne Gebäude- und Verkehrsfläche (unbebaute Fläche der bebauten Besitzeinheiten) (Luftbild: Esri)

Insgesamt wurden aus 9.235.464 Flurstücken 4.118.236 Besitzstücke gebildet, die mit einem oder mehreren Gebäude(n) bebaut sind. Die ermittelte Gebäudegesamtzahl beträgt in NRW 9.175.144. Grundlage war der ALK Datenbestand für NRW von 2012. In Tabelle 1 sind die Größenklassen der bebauten Besitzstücke in NRW aufgelistet.

Tabelle 1: Größenklassen bebauter Besitzstücke im Land NRW

Größenklasse bebauter Besitzstücke [qm]	Anzahl Besitzstücke
< 100	304.496
100 – 200	268.517
200 – 500	1.256.623
500 – 1.000	1.363.564
1.000 – 2.000	472.574
2.000 – 5.000	218.224
5.000 – 10.000	86.345
10.000 – 50.000	109.360
50.000 – 100.000	22.111
100.000 – 1.000.000	15.624
> 1.000.000	798
Summe:	4.118.236

Drei Viertel der Besitzstücke liegen im Bereich von 200 bis 2.000 m² Grundfläche. Hierbei handelt es sich weitestgehend um Ein-, Zwei- und kleinere Mehrfamilienhäuser. 798 Flächen sind größer als 1 km². Hierbei handelt es sich u. a. um land- und forstwirtschaftlichen Besitz mit einem oder mehreren Gebäuden.

3.1.2. Gebäudenutzung (Bestandsimmobilien)

In den Grundlagendaten ist jedem Gebäude einer von insgesamt 238 Objektschlüsseln zugeordnet, welche eine Differenzierung der Gebäude nach Nutzungsart zulassen. Anhand dieses Objektschlüssels (OS) ist es möglich, eine Sortierung nach Wohn- und Nicht-Wohngebäuden durchzuführen. Des Weiteren können Gebäude aussortiert werden, für die eine (geothermische) Beheizung nicht relevant ist (z. B. Garagen, Silos, Wartehäuschen etc.). Darüber hinaus ist es möglich, Gebäude mit stark abweichendem Wärmebedarf zum Standardfall zu identifizieren und gegebenenfalls gesondert zu betrachten (z. B. Krankenhäuser, Hallenbäder, Altenheime etc.).

Insgesamt wurden über die vorhandenen Objektschlüssel folgende Nutzungsgruppen differenziert.

- 0.) Aussortierte Gebäude (z.B. Garagen, landwirtschaftliche Betriebsgebäude insbes. Scheunen etc.)
- 1.) Wohngebäude (z.B. Wohnhaus (allgemein), Einzelhaus etc.)
- 2.) Nicht-Wohngebäude (z.B. Gewerbe- und Industriegebäude, Büro- und Verwaltungsgebäude, Schulen, Handel etc.)
- 3.) Sondergebäude mit hohem Wärmebedarf (z.B. Gewächshäuser, Krankenhäuser, Hallenbäder etc.)
- 4.) Sondergebäude mit niedrigen Wärmebedarf (z.B. Fabrikgebäude, Kirchen, Veranstaltungs-/Saalgebäude etc.)

Die gebildeten Nutzungsgruppen sind nachfolgend (s. Tab. 2) detailliert dargestellt.

Tabelle 2: Klassifizierung nach Nutzungsgruppen

ID Gruppe	Nutzungsgruppe	Anzahl Gebäude	Gebäudefläche in km ²	Anteil an Gesamtfläche in %
0	Aussortierte Gebäude	3.322.304	205,62	19,2
1	Wohngebäude	4.158.159	482,85	45,1
2	Nicht-Wohngebäude	1.390.382	285,33	26,7
3	Sondergebäude mit hohem Heizbedarf	31.462	25,381	2,4
4	Sondergebäude mit niedrigen Heizbedarf	272.837	70,060	6,6
Summe		9.175.144	1.069,54	100,0

Grundsätzlich handelt es sich um eine grobe Einordnung der Gebäude. In Einzelfällen lässt sich anhand des Objektschlüssels keine eindeutige Zuordnung treffen (z. B. für die Schlüssel "Empfangsgebäude für Verkehrsteilnehmer (allgemein)", "Gebäude für Botanik (allgemein)" etc.). Des Weiteren ist eine Mischnutzung nicht in einem Objektschlüssel hinterlegt und konnte somit auch nicht berücksichtigt werden. Die Folge ist, dass die gebäudescharf zugewiesene Nutzungsart von der tatsächlichen Nutzung im Einzelfall abweichen kann.

3.1.3. Neubaugebiete

Das geothermische Potenzial welches im Rahmen von Neubaumaßnahmen erschlossen werden kann, soll mit in die Potenzialermittlung einfließen. Auf Grund fehlender flächendeckender Datensätze zu geplanten Neubaugebieten kann die Erfassung nicht über die GIS-Bearbeitung abgedeckt werden. Ersatzweise wurde anhand der Statistiken über die Baufertigstellungen (bereitgestellt von IT.NRW) für jede Gemeinde eine Neubauquote definiert. Diese Neubauquote (m² Neubaufäche pro Jahr) wurde unter der Annahme einer zu 100% möglichen Versorgung mit Geothermie und einem Wärmebedarf in Anlehnung an die EnEV 2009 mit in die Potenzialermittlung einbezogen. Auf Grund des geringen Wärmebedarfs von Neubauten ist davon auszugehen, dass die Freifläche um das Gebäude herum bzw. die Fläche unter dem Gebäude ausreichend groß zur Versorgung des Gebäudes mit Erdwärme ist. Dies gilt in den meisten Fällen auch für Besitzeinheiten die auf einer Restriktionsfläche liegen und somit Nutzungseinschränkungen unterliegen. Somit entspricht bei Neubauten das geothermische Potenzial dem Wärmebedarf des Gebäudes. Der zulässige Primärenergiebedarf von Neubauten wird über das Referenzgebäudeverfahren individuell für das jeweilige Gebäude bestimmt. Allgemeingültige Grenzwerte sind nicht vorhanden. Je nach Heizsystem zeigt sich zudem das Verhältnis von Primärenergiebedarf und Endenergiebedarf sehr heterogen. In Anbetracht der hier zugrunde liegenden Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe und der vorliegenden Erfahrungswerte werden folgende Pauschalwerte (s. Tab. 3) für den Wärmebedarf für Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude zum Ansatz gebracht.

Tabelle 3: Wärmebedarf Neubauten

Gebäudetyp	Wärmebedarf (Heizwärme und Warmwasser) [kWh/m ²]
Wohngebäude	77,5
Nicht-Wohngebäude	65

Die Statistik der Baufertigstellungen für Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude liegt für die Jahre 1987 bis 2011 für jede Gemeinde in NRW vor. Die statistische Auswertung erfolgt über die letzten sechs Jahre der Daten. Im Rahmen der Auswertung der Statistik lässt sich in den Jahren 1988 bis 2001 ein Anstieg der Neubauaktivität erkennen, während in den nachfolgenden Jahren bis 2005 ein kontinuierlicher Abfall zu beobachten ist. In den Jahren 2006 bis 2011 zeichnet sich ein gleichförmiger Trend ab. Daher wurden für die Vorausberechnung der Neubauaktivität die Jahre 2006 bis 2011 angesetzt. Für ganz NRW ergibt sich hiernach eine Neubaufäche für Wohn- und Nichtwohngebäude von 7,6 km² pro Jahr. Dies entspricht einer Neubauquote von knapp einem Prozent.

3.2. Ermittlung bestehender Flächenrestriktionen

Auf den ermittelten Besitzeinheiten kann aufgrund vorhandener Restriktionen (z.B. aufgrund von ausgewiesenen Wasser- oder Heilquellenschutzgebieten) eine geothermische Nutzung des Untergrunds ausgeschlossen sein. Daher wurden die ermittelten Besitzeinheiten in einem GIS mit ausgewiesenen Restriktionsflächen – die eine geothermische Nutzung ausschließen oder nur mit Einschränkungen erlauben - verschnitten. Das Ergebnis sind Besitzeinheiten ohne vorhandene Restriktionen bzw. mit eingeschränkter Nutzung, auf denen aus landesweiter Sicht eine geothermische Nutzung möglich ist. Nach dem derzeitigen Stand können Restriktionsflächen grundsätzlich identifiziert werden über

- *die Flächennutzung:*
Durch Gebäude, nicht nutzbare Verkehrsflächen (Straßen, Wege, Plätze) sowie sonstige Nutzungen (Gewässer), sind für die geothermische Nutzung ausgeschlossen (siehe Abschnitt 3.1).
- *die Gebäudenutzung:*
Besitzstücke, die ausschließlich durch Gebäude bebaut sind, die auf Grund ihrer ausgewiesenen Nutzung nicht für eine geothermische Nutzung in Frage kommen. (Hierzu zählen Gebäude ohne entsprechende Heizflächen; siehe Abschnitt 3.1.2)
- *genehmigungsrechtliche Belange:*
Flächen im Bereich von Schutzzonen von Wasser- und Heilquellenschutzgebieten und sonstigen umweltrelevanten, geologischen und hydrogeologischen Restriktionen können genehmigungsrechtlichen Auflagen unterliegen, die bis zu einem Ausschluss einer geothermischen Nutzung führen können.
- *unrentable Gebiete:*
Flächen, bei denen keine wirtschaftliche Erschließung der Geothermie erfolgen kann (insbesondere Gebiete mit stark abgesenktem Grundwasserspiegel im rheinischen Braunkohlerevier etc.).

3.2.1. Restriktionen durch Wasserschutz- und Heilquellenschutzgebiete und generelle Anforderungen des Grundwasserschutzes

Erdwärmesonden stellen aus wasserrechtlicher Sicht einen Nutzungstatbestand nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) dar. Für die Zulassung der einzelnen Sondenanlagen sind daher die Wasserbehörden zuständig. Im Rahmen dieser Zulassung erfolgt eine standortbezogene Prüfung. Die zu stellenden Anforderungen können daher nicht einheitlich und allgemeingültig beschrieben werden. Infolgedessen sind bei Erdwärmesondenanlagen grundsätzliche Vorkehrungen zum Schutz des Grundwassers erforderlich. Diese beziehen sich u.a. auf qualitative und technische Anforderungen und können Restriktionen bezüglich des Einsatzes wassergefährdender Stoffe und insbesondere Temperaturregulierungen enthalten. Darüber hinaus sind besondere Schutzvorkehrungen in Wasserschutzgebieten - insbesondere im Hinblick auf das eingesetzte Wärmeträgermedium und die mögliche Verbindung von Grundwasserstockwerken über die Bohrung - zu treffen. Nach § 19 Abs. 2 Nr. 1 WHG können in Wasserschutzgebieten bestimmte Handlungen verboten oder für beschränkt zulässig erklärt

werden. In NRW sind Einschränkungen, insbesondere innerhalb von Wasserschutz- und Heilquellenschutzgebieten der Zonen III, IIIa, IIIb und IIIc landesweit bisher nicht einheitlich geregelt. Die individuelle Genehmigung liegt in der Zuständigkeit der jeweiligen unteren Wasserbehörde.

Bei der bisherigen Genehmigungspraxis konnten in vielen Fällen in NRW Erdwärmesondenanlagen in den Zonen III, IIIa, IIIb und IIIc genehmigungsfähig sein, wobei entsprechende Auflagen beim Bau und Betrieb im Einzelfall aufgrund wasserrechtlicher Nebenbestimmungen oder gemäß den Anforderungen der Schutzgebietsverordnung eingehalten werden müssen. Teilweise kommt es – wie auch in Gebieten mit geologischen oder bergbaubedingten Risiken – auch hierbei zu Tiefenbeschränkungen.

Zukünftig ist eine gesetzliche Neuregelung im Bereich von Wasserschutzgebieten zu erwarten: Zum einen soll auf Bundesebene über die Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV, Entwurf vom 22.07.13) der Neubau und die Erweiterung von Erdwärmesondenanlagen der gewerblichen Wirtschaft oder öffentlichen Einrichtungen in den Schutzzonen I–II und III/IIIa verboten werden, sofern wassergefährdende Stoffe eingesetzt werden. Die noch ausstehende Notifizierung der AwSV ist für das I. Quartal 2014 geplant. Zum anderen erfolgt auf Landesebene derzeit eine Überarbeitung des LUA-Merkblattes Nr. 48 „Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme“ (LUA, 2004). Für die Potenzialstudie wurde daher folgende Vorgehensweise abgestimmt.

- 1.) Die Schutzzonen I und II wurden als Ausschlussflächen definiert.
- 2.) Für die Zonen III, IIIa, IIIb und IIIc wurden zwei Szenarien betrachtet:
 - a) Szenario A: Die Sondentiefe wird auf 40 m begrenzt und der Betrieb der Sondenanlage mit Wasser wird vorgeschrieben.
 - b) Szenario B: Diese Flächen stellen Ausschlussflächen dar.

Die Wasserschutzzonen I und II liegen unmittelbar im Bereich von Trinkwassergewinnungsanlagen, daher ist dort der Einsatz Oberflächennaher Erdwärmesondensysteme landesweit verboten. Für die Zonen III/IIIa wird zukünftig von einem Verbot ausgegangen, wobei Ausnahmegenehmigungen in Einzelfällen erteilt werden können. Für die Zonen IIIb, c ist mit weitgehenden Anforderungen und möglichen Restriktionen zu rechnen. Um eine Szenarienbetrachtung nicht verwirrend zu gestalten, wurde sich innerhalb der projektbegleitenden Arbeitsgruppe darauf geeinigt, nicht mehr als zwei Szenarien zu beschreiben. Infolgedessen wurden in der vorliegenden Studie für die Zonen III, IIIa, IIIb und IIIc (s. Abb. 6) zwei Varianten (Szenarien) betrachtet. Bei einer Betrachtung der Zonen III, IIIa, IIIb und IIIc als generelle Ausschlussflächen, würde es zu einer Unterbewertung der Potenziale kommen. Andererseits würde es zu einer Überbewertung der Potenziale kommen wenn diese Flächen nicht restriktiv behandelt werden würden. Die gewählte Herangehensweise, die Zonen III, IIIa, IIIb und IIIc zusammenzufassen und sie restriktiv (A) sowie als Ausschlussfläche (B) zu betrachten, stellte sich als die praktikabelste Lösung heraus und bildet so eine gute Bandbreite sinnvoller Potenziale ab. Die Sondentiefe wurde pauschalierend auf 40 m begrenzt (vgl. 3.2.2), da u.a.

bei vielen Standorten in NRW die Durchörterung stockwerkstrennender Schichten vermieden werden muss und der tatsächlich mögliche Tiefenbereich unterschiedlich sein kann.

Trinkwasser- und Heilwassergewinnungsanlagen ohne Ausweisung einer Wasserschutzzone wurden nicht als Restriktionsflächen berücksichtigt, da vollständige Lagedaten nicht landesweit zur Verfügung standen. Es handelt sich hierbei um lokal begrenzte Restriktionen, die eine Einzelfallentscheidung bedingen.

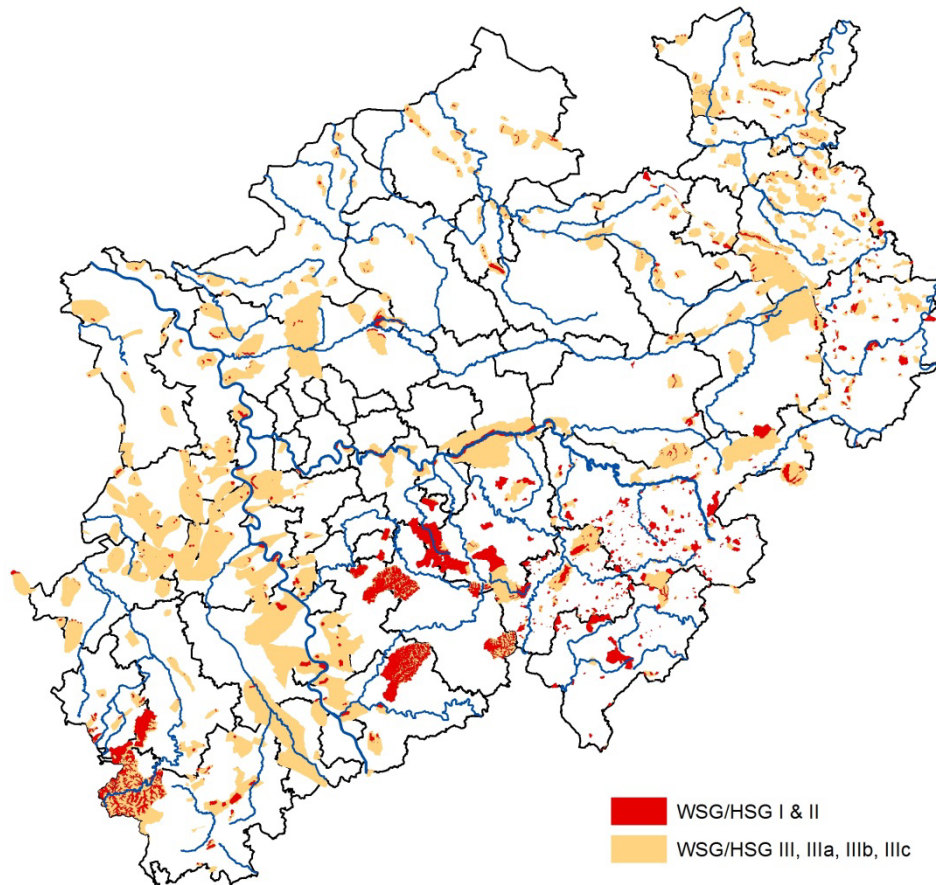


Abbildung 6: Schutzzonen (WSG und HSG) I und II sowie III, IIIa, IIIb und IIIc

Zu den generell erforderlichen Mindest-Anforderungen aus Sicht des Grundwasser- und Trinkwasserschutzes wird auf die Empfehlungen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 2011) hingewiesen, sowie auf die derzeitige Aktualisierung des LUA-Merkblattes 48 (LANUV FB 52; landesweite Arbeitsgruppe). Wenn diesbezüglich formulierte Anforderungen (hinsichtlich Standortbeurteilung, Planung, Materialien, Betriebsweise, Qualifikation der zu beauftragenden Firmen, Ausführung und Anlagenüberwachung) beachtet und eingehalten werden, kann davon ausgegangen werden, dass die geothermische Wärmegewinnung keinen Widerspruch zur Sicherung der Grundwasserressourcen (Bewirtschaftungsziele nach §§ 48 und 49 WHG) im Sinne einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung und zum Schutz der Trinkwasserreserven darstellt.

3.2.2. Weitere Restriktionsflächen

Neben den o.a. Wasserschutzgebieten sind weitere Restriktionen zu betrachten, die zu Nutzungseinschränkungen bzw. zum Ausschluss von Erdwärmennutzungen führen können. Hierzu zählen:

- | | | |
|---|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Vorhandensein von verkarstungsfähigem Gestein 2. Gebiete mit CO₂ und CH₄ im Grundwasser 3. Bereiche mit Salzwasseraufstieg 4. artesisch gespannte Verhältnisse 5. nachteilige Druckpotenzialunterschiede 6. hydrogeologisch ungünstiger Stockwerksbau | } | hydrogeologisch kritische Bereiche (flächendeckend für NRW verfügbar) |
| <ol style="list-style-type: none"> 7. Altlastenflächen 8. oberflächennaher (Alt-) Bergbau | } | nicht flächendeckend für NRW verfügbar; Einzelfallprüfung |

Die Restriktionsbereiche 1 – 6 der Auflistung sind Bestandteil der sogenannten „Standortbeurteilungskarte („Ampelkarte“) für den Einbau und Betrieb von Erdwärmesonden“ des Geologischen Dienstes NRW (GD NRW, vgl. Abb. 7). In diesen Bereichen muss zum Schutz des Grundwassers und der Anlage ein besonderes Augenmerk auf die bohrtechnische Umsetzung und den nachhaltigen Betrieb von Anlagen gelegt werden. In den meisten Fällen gewährt eine Tiefenbegrenzung der Bohrung die größte Sicherheit. Eine Tiefenbegrenzung verhindert z.B. das Risiko von hydraulischen Kurzschlüssen (Wasseraustausch zwischen Grundwasserstockwerken) durch Bohrungen oder auch das Anbohren der hydrogeologisch oder bergbaubedingt kritischen Einheiten.

Die Tiefenlage der kritischen Einheiten ist geologisch oder bergbaubedingt vorgegeben und regional sehr unterschiedlich. Sie kann in seltenen Fällen zwischen 10 m unter Geländeoberkante reichen, jedoch auch bis zu der in dieser Studie betrachteten maximalen Tiefe von 100 m. Da Tiefenbegrenzungen von Seiten der Genehmigungsbehörden aufgrund der jeweiligen lokalen Verhältnisse zudem unterschiedlich definiert bzw. vorgegeben werden, sind konkrete flächendeckende Angaben nicht möglich. In Absprache mit dem GD NRW wurde daher für die Potenzialbetrachtung in den oben genannten kritischen Bereichen eine mittlere Tiefenbegrenzung von 40 m angesetzt. Durch diese Begrenzung wird verhindert, dass Bereichen, in denen aus wasserrechtlicher Sicht mit einer Tiefenbegrenzung zu rechnen ist, ein zu hohes geothermisches Potenzial zugewiesen wird. Während mit den angesetzten 40 m in einer Vielzahl von Fällen das Erreichen des 2. Grundwasserleiters verhindert wird, führen sie in den Bereichen, in denen die hydrogeologisch kritischen Einheiten tiefer als 40 m liegen, zu dementsprechend geringeren Potenzialwerten. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Unsicherheiten bei einer landesweiten Betrachtung wieder ausgleichen.

In der Praxis ist für jede Geothermieanlage eine Einzelfallprüfung durchzuführen und die Sondentiefe abhängig von den lokalen hydrogeologischen Verhältnissen zu wählen. Hier können sich Sondentiefen von deutlich < 40 m aber auch > 40 m ergeben.

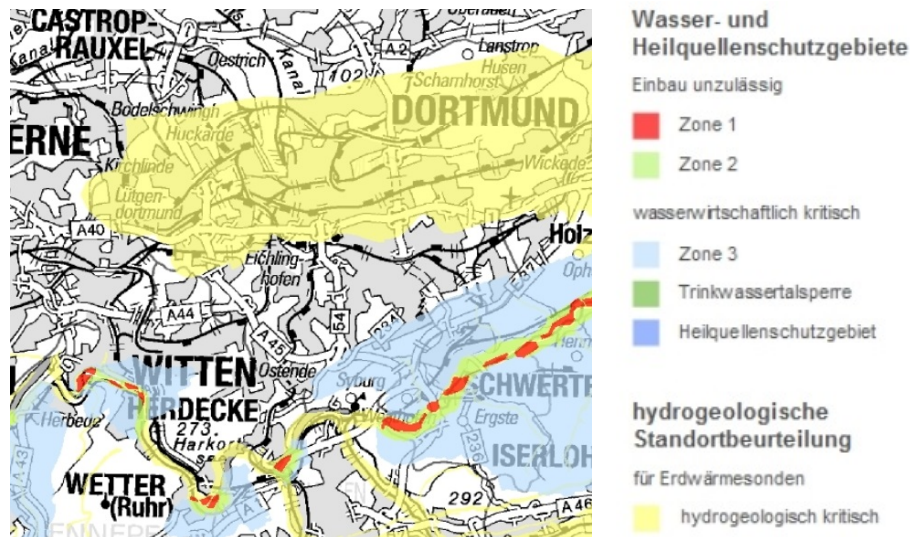


Abbildung 7: Auszug aus der Standortbeurteilungskarte („Ampelkarte“) für den Einbau und Betrieb von Erdwärmesonden (GD NRW)

Die Restriktionsflächen (1 – 6) wurden vom Geologischen Dienst bereitgestellt und im Kartenwerk markiert, so dass diesen Flächen die genannten Restriktionsbedingungen zugeordnet werden konnten. Außerhalb der o.g. Restriktionsflächen und Wasserschutzzonen wurde in der vorliegenden Studie unabhängig von der Genehmigungspraxis der jeweiligen Unteren Wasserbehörde immer eine Sondenreferenztiefe von 100 m betrachtet.

Altlastenflächen (7)

Altlastenflächen sind nicht flächendeckend für NRW vorhanden und wurden nicht als Restriktionsfläche bzw. Sonderflächen berücksichtigt. Diese unterliegen der Einzelfallprüfung der unteren Wasserbehörden.

Altbergbau (8)

Negative Auswirkungen auf eine geothermische Erschließung des Untergrunds stellen aufgrund des Altbergbaus insbesondere Setzungen sowie unverfüllte Stollen und Abbaubereiche und die daraus entstandenen Hohlräume dar. Zum einen können beim Anbohren der Hohlräume Bohrspülungsverluste auftreten, welches eine kostenintensive Verrohrung zur Folge hat. Zum anderen kann beim Sondeneinbau im Bereich von Hohlräumen aus dem Altbergbau keine ordnungsgemäße Ringraumverfüllung (Hinterfüllung) mit Bentonit/Zement-Suspensionen erfolgen.

Die bergbaulichen Restriktionsflächen können jedoch für NRW nicht flächendeckend mit einer ausreichenden Schärfe dargestellt werden. Bergbauliche Restriktionen sind i.d.R. lokal begrenzt und bedürfen einer Einzelfallentscheidung. In der Potenzialermittlung wurden sie daher nicht als Restriktionsflächen bzw. Sonderflächen berücksichtigt. Es erfolgt keine Sonden-tiefenbegrenzung sowie kein pauschaler Abzug. Daher können sich in einigen Gebieten Nordrhein-Westfalens, vor allem im Ruhrgebiet, Abweichungen bei der Potenzialermittlung ergeben.

Die Wirtschaftlichkeit wurde bei dieser Studie nicht betrachtet. Die Abhängigkeiten zu anderen Energieträgern und zu den politischen Rahmenbedingungen sind nicht prognostizierbar.

Einzigste Ausnahme bilden unrentable Gebiete, die sehr schlecht wärmeleitende trockene Lockersedimente aufweisen. Hierbei handelt es sich um die flächendeckenden und dauerhaften anthropogenen Grundwasserabsenkungen im rheinischen Braunkohlerevier sowie Flächen mit geogen bedingtem stark abgesenktem Grundwasserspiegel wie z.B. die grundwasserfreien Lockersedimente (vorzugsweise Sande) im Bereich Reichswald (Kreis Kleve), im Bereich Halterner Sande (Kreis Recklinghausen), im Grafenberger Wald (Stadt Düsseldorf) etc.. Die Wärmeleitfähigkeiten liegen im Bereich von Flächen mit ausschließlich trockenen Sedimenten bei 0,3 -0,5 W/(m K) und somit deutlich niedriger als in Gesteinen mit normaler oder hoher Wärmeleitfähigkeit, so dass eine effiziente Nutzung von Erdwärmesonden hier nicht möglich ist. Gemäß Blatt 2 der VDI 4640 liegt bereits bei einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda < 1,5$ W/(m K) ein schlechter Untergrund für die Nutzung von Erdwärmesonden vor (VDI 4640b, 2001). In der vorliegenden Studie wurde mit 0,75 W/(m K) die Hälfte des o.g. VDI 4640-Wertes als Grenzwert für die Effizienz gewählt. Somit wurden die Flächen als Ausschlussflächen definiert, die sehr schlecht wärmeleitende Gesteine aufweisen. Flächen die Gesteine mit einer Wärmeleitfähigkeit zwischen 0,75 W/(m K) und 1,5 W/(m K) aufweisen, wurden in dieser Studie jedoch berücksichtigt, da zwar ein schlechter Untergrund vorliegt, jedoch nicht auszuschließen ist, dass diese Flächen auch rentabel erschlossen werden können. Auf die gesamte Landesfläche bezogen betrifft dies einen sehr kleinen Flächenanteil von ca. 2 % (vgl. Kap. 4.1.1).

3.3. Verschneiden der Flächeninformationen

Die zuvor genannte Vorgehensweise wurde anschließend durch eine GIS-gestützte Verarbeitung umgesetzt.

Als Ergebnis liegen für jede Besitzeinheit Angaben zur Brutto- und Nettofläche vor. Die Aggregation ergibt für die gesamte Landesfläche NRW nachfolgend (Tab. 4) dargestellte geothermische nutzbaren Brutto- und Nettoflächen.

Tabelle 4: Geothermisch nutzbare Flächen im Land NRW

Flächenstatus	Fläche [km²]
Bruttofläche der Besitzeinheiten (Gesamtfläche über NRW)	15.038,0
Ausschlussfläche*	1.165,5
Nettofläche ohne Restriktion (Sondentiefen bis 100 m)	7.482,6
Nettofläche mit Restriktion (Sondentiefen bis 40 m und Glykol)	3.545,6
Nettofläche mit Restriktion (Sondentiefen bis 40 m und Wasser)	2.844,3

* Ausgeschnittene Gebäudeflächen und Flächenanteile an Wasserschutzgebieten der Zone I und II innerhalb der Besitzstücke (liegt eine Teilfläche eines Besitzstückes innerhalb der Schutzzone I und II wurde auch nur dieser Flächenanteil ausgeschnitten. Die Restfläche bleibt bestehen).

4. Ermittlung der theoretisch nutzbaren geothermischen Potenziale

Im Rahmen der geothermischen Potenzialanalyse wurden landesweit für die nutzbaren Freiflächenanteile der in Kap. 3 ermittelten Besitzstücke die theoretisch nutzbaren geothermischen Potenziale für die Nutzung mittels oberflächennaher Erdwärmesonden ermittelt.

Das geothermische Potenzial des oberflächennahen Untergrundes ist in erster Linie abhängig von:

- dem geothermischen Regime im oberflächennahen Untergrund (geothermische Untergrundeigenschaften am Standort mit den Parametern Wärmeleitfähigkeit, Untergrundtemperatur, geothermischer Wärmefluss und Wärmekapazität)
- der Jahresverteilung / des Lastganges des geothermischen Wärmeentzuges
- dem erschlossenen geothermischen Reservoirvolumen (relevante Parameter: nutzbare Grundstücksfläche und Erschließungstiefe der Erdwärmesonden)

Mit Hilfe von unterschiedlichen Berechnungen kann für jedes einzelne Besitzstück entsprechend der ermittelten o.g. Parameter die jeweilige geothermische Ergiebigkeit bestimmt werden. Hierbei wurde auf das Simulationsprogramm EED (Earth Energy Designer EED 3.16) zur Dimensionierung von Erdsonden bzw. Erdsondenfeldern (vgl. Abschnitt 4.4.1) zurückgegriffen.

4.1. Geothermisches Regime im oberflächennahen Untergrund

4.1.1. Wärmeleitfähigkeit

In der oberflächennahen Geothermie stellt die effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) einer der wesentlichen Eingangsgrößen dar. λ_{eff} beschreibt das Wärmeleitvermögen des Untergrundes über Konduktion (Wärmefluss durch Temperaturunterschied). Je höher die Wärmeleitfähigkeit (WLF), desto höher ist die geothermische Ergiebigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit ist abhängig von der mineralischen Zusammensetzung, der Schichtung sowie der Größe, der Geometrie und der Füllung der Gesteinshohlräume (Poren bzw. Klüfte). Sie kann dementsprechend lokal sehr stark variieren.

Die Wärmeleitfähigkeitsdaten für NRW wurden durch den GD NRW aus dem Fachinformationssystem „Geothermie“ (Stand: Juni 2013) bereitgestellt. Dieses enthält ein auf geothermische Fragestellungen ausgerichtetes landesweites geologisch-hydrogeologisches Untergrundmodell bis 100 m Tiefe. Innerhalb des Modells wurden allen geothermisch relevanten Gesteinsarten (Lithologien) Wärmeleitfähigkeiten zugeordnet.

Da die Wärmeleitfähigkeit einer von vielen Parametern ist, die im Rahmen der Landesaufnahme von Interesse sind, wird das Fachinformationssystem „Geothermie“ des GD NRW zukünftig eine weitere Regionalisierung in Bezug auf die Wärmeleitfähigkeiten erfahren.

Durch Fortschritte und neue Erkenntnisse in der „Geologischen Landesaufnahme“ wird das Modell fortwährend aktualisiert. Dies kann auch Auswirkungen auf das geothermische Potenzialangebot des Untergrundes haben.

Entsprechend dem Schichtaufbau variieren die Wärmeleitfähigkeiten mit der Tiefe. Die effektive Gesamtwärmeleitfähigkeit für die Sondentiefe von 40 m bzw. 100 m wurde durch arithmetische Mittelung der Einzelwärmeleitfähigkeiten der über diesen Tiefenbereich aufgeschlossenen geologischen Formationen gebildet.

Die seitens des GD NRW für die Bruttofläche der Besitzeinheiten von 15.038km² (ca. 44% der Landesfläche) gelieferten Wärmeleitfähigkeiten liegen in einer Bandbreite von 0,3 – 3,78 W/(m K) vor. Nachfolgend (Abb. 10) ist die Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten für die Landesfläche von NRW dargestellt.

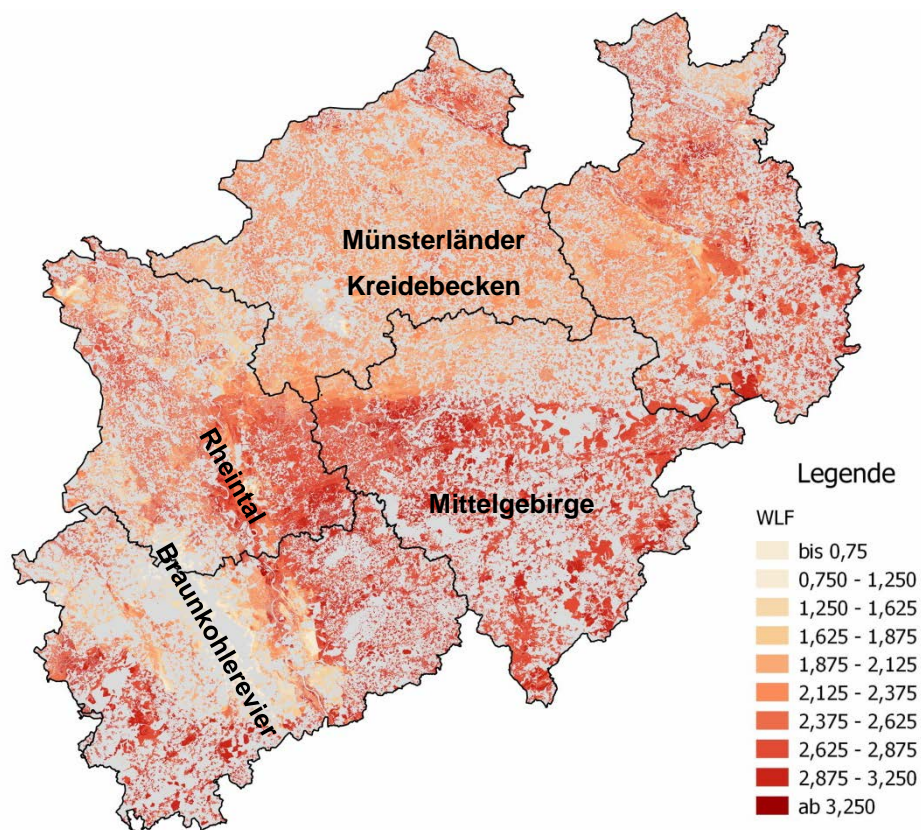


Abbildung 8: Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten im Land NRW (GD NRW 2013); Die Darstellung erfolgt ausschließlich für Flächen, auf denen eine geothermische Nutzung möglich ist

In der Abbildung 8 sind die regionalen Unterschiede der Wärmeleitfähigkeiten in NRW zu erkennen:

- **Münsterländer Kreidebecken:** Hier überwiegen halbfeste Kreidemergel mit geringen bis mittleren WLF im Bereich 1,8 - 2,2 W/(m K)
- **Rheintal:** Hier überwiegen Lockersedimente, die in quartären Sanden und Kiesen hohe bis sehr hohe Grundwasserergiebigkeiten und effektive Wärmeleitfähigkeiten aufweisen können (z.T. > 3 W/m K).

Darunter folgen zumeist geringer leitende Lockersedimente aus dem Tertiär, so dass bei größeren Sondertiefen die Gesamt-WLF eher im mittleren bis hohen Bereich (2 – 2,5 W/m K) anzusetzen ist.

- **Mittelgebirgsregionen (Eifel, Sauerland, Ostwestfalen):** Es handelt sich hierbei weitestgehend um Festgesteine (Ton-, Kalk-, Sandstein etc.) mit mittleren bis (sehr) hohen Wärmeleitfähigkeiten (2 - 2,8 W/(m K; Ausnahmen > 3,0 W/(m K))
- **Rheinisches Braunkohlerevier:** Aufgrund des Tagebaus kommt es zu flächendeckenden massiven Grundwasserabsenkungen in Lockersedimenten (Wärmeleitfähigkeiten sind sehr gering mit Werten unterhalb von 0,75 W/m K)

Für die Ermittlung der geothermischen Flächenpotenziale über Simulationsrechnungen wurden daraufhin insgesamt zehn repräsentative Wärmeleitfähigkeitsklassen gebildet.

4.1.2. Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität ist ein Maß für die Speicherung thermischer Energie. In der oberflächennahen Geothermie wird i.d.R. die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität $C_{s(v)}$ mit der Maßeinheit MJ/(m³·K) verwendet. Für das typische oberflächennah anzutreffende Gesteinsinventar in NRW ist bei der geringen Variabilität der Wärmekapazität der Einfluss auf die geothermische Ergiebigkeit im Vergleich zur Wärmeleitfähigkeit gering, so dass hier auf eine räumliche Differenzierung verzichtet wurde (Signorelli & Kohl, 2002).

Auf Grundlage einer Mittelwertbildung über die Tabellenwerte der VDI 4640 Blatt 1 wurde für die in Nordrhein-Westfalen anzutreffenden sedimentären Locker- und Festgesteine eine mittlere volumenbezogene Wärmekapazität von $C_{s(v)} = 2,1 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$ bestimmt. Die gesamte Bandbreite liegt bei 1,5 – 2,5 MJ/(m³ K).

4.1.3. Erdreichtemperatur

Neben der Wärmeleitfähigkeit ist der Einfluss der ungestörten Erdreichtemperatur $T_{0(U)}$ auf die Ergiebigkeit der Wärmequelle signifikant.

Mit steigender bzw. sinkender Erdreichtemperatur steigt bzw. sinkt die geothermisch nutzbare Temperaturdifferenz. Je höher $T_{0(U)}$ ist, desto größer ist die Differenz zur minimalen mittleren Wärmeträgertemperatur T_{EWSmin} (=minimale Auslegungstemperatur der Erdwärmesondenanlage nach 50 a Betriebszeit; vgl. Kap. 4.4.2) und desto höher ist die mögliche Wärmezugleistung der Geothermieanlage.

Die wesentlichen Einflussgrößen auf die ungestörte Erdreichtemperatur sind

- der vertikale Temperaturgradient G_T
- die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche T_{Om}

Der Temperaturgradient ist wiederum abhängig von dem geothermischen Wärmefluss, der Wärmeleitfähigkeit und lokalen Einflüssen wie der Grundwasserströmung. Für Flach- und Mittellandbereiche in Mitteleuropa und somit auch für die gesamte Landesfläche von NRW ist ein mittlerer Temperaturgradient von $G_T = 3^\circ\text{C} / 100\text{ m}$ zu Grunde zu legen (Kaltschmitt, et. al, 1999). Zwar sind in den oberen 100 m durchaus Abweichungen vom mittleren Temperaturgradienten vorhanden, jedoch sind die Einflüsse sehr komplex und nicht ausreichend quantifizierbar.

Die Variabilität der Temperatur an der Erdoberfläche (s. Abb. 9) kann dagegen nicht vernachlässigt werden, auch wenn auf die gesamte Landesfläche von NRW bezogen die Unterschiede bei den Klimabedingungen und den damit in Verbindung stehenden Jahresmitteltemperaturen an der Erdoberfläche eher als gering bis mittel einzustufen sind. Wichtet man die Jahresmitteltemperaturen an der Erdoberfläche entsprechend der Bevölkerungsverteilung, liegt die mittlere Temperatur in NRW bei ca. 10°C , da in den Mittelgebirgen und im Bereich der Höhenzüge nur geringe Bevölkerungsanteile zu finden sind.

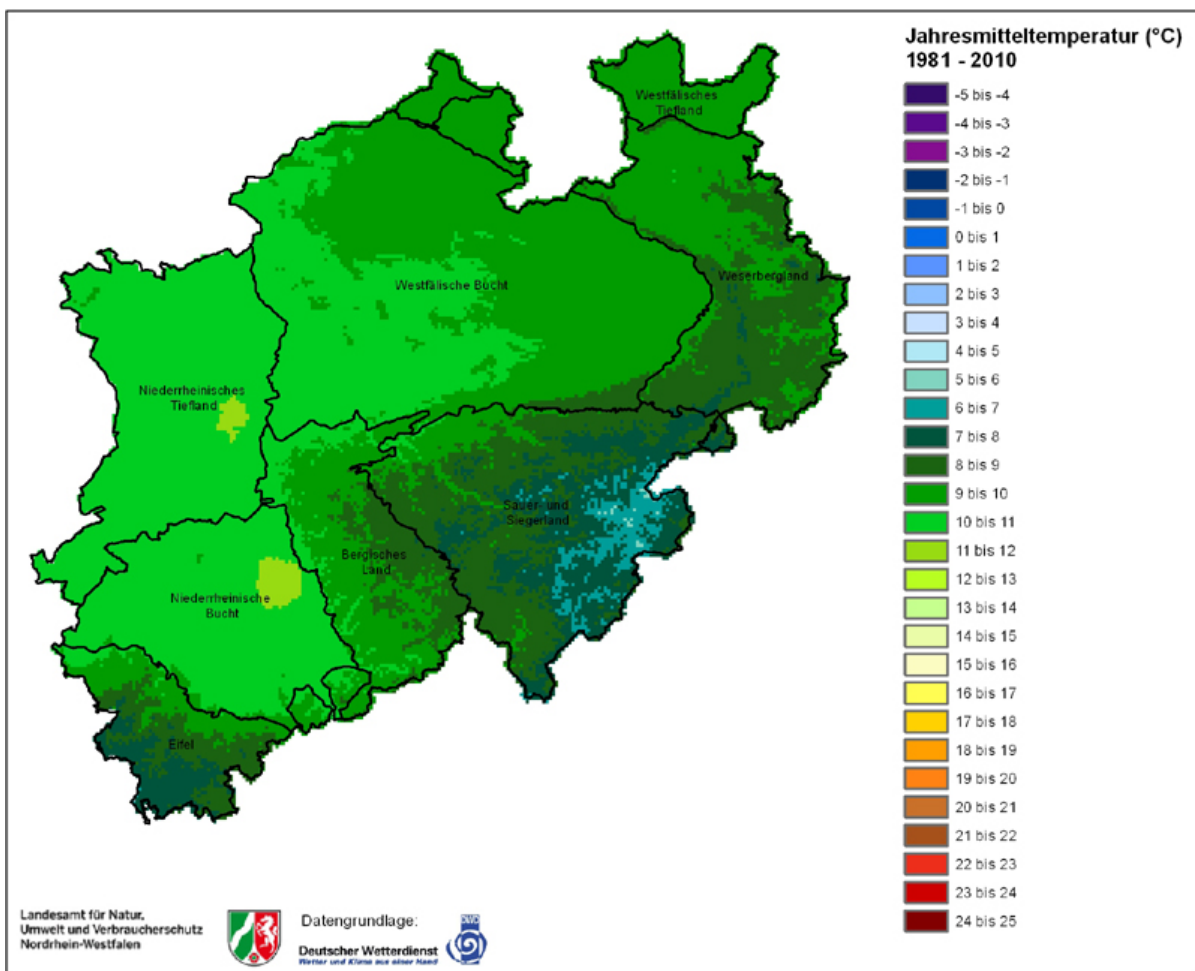


Abbildung 9: Jahresmitteltemperatur in NRW im Zeitraum 1981 – 2010 (LANUV NRW, 2013)

Für die Einbeziehung der ungestörten Erdreichtemperaturen in die geothermische Potenzialstudie wurde ein linearer Ansatz gewählt. Geht man von einem mittleren geothermischen Gradienten (G_T) von $3^\circ\text{C} / 100\text{ m}$ aus, kann man bei Einbeziehung der mittleren Jahrestemperatur an der Erdoberfläche (T_{Om}) und der Sondenlänge, die gemittelte ungestörte Erd-

reichtemperatur $T_{0(U100)}$ berechnen. Aufgrund der linearen Abhängigkeit zwischen Untergrundtemperatur und Ergiebigkeit wurde entschieden, den Temperatureinfluss daher nicht wie bei der Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Klassen mit einem Simulationsprogramm zu berechnen, sondern über eine entsprechende Funktionsbeziehung zu betrachten:

$$F_{Temp} = \frac{T_{Om} - T_{EWS\ min} + G_T \times \text{Sondenlänge}/2}{10^\circ - T_{EWS\ min} + G_T \times \text{Sondenlänge}/2}$$

Wurde dem Besitzstück demnach eine mittlere Jahrestemperatur an der Erdoberfläche von 8°C zugeordnet, ergibt sich bei einer 100 m langen Sonde eine nutzbare Temperaturdifferenz von 8 K - (-1,5 K) + 1,5K = 11 K. Gegenüber der Referenzsimulation ($T_{Om} = 10^\circ\text{C}$) mit einer nutzbaren Temperaturdifferenz von 13 K beträgt dann der Multiplikator $F_{Temp} = 11/13 = 0,85$. D.h. die Ergiebigkeit der Geothermie-Anlage reduziert sich in diesem Fall um 15 %.

So wurde für jedes Besitzstück entsprechend des zugeordneten Temperaturwertes und der Sondenlänge ein prozentualer Abschlag bzw. Aufschlag vorgenommen. Eine vergleichbare Vorgehensweise wird auch seitens der SIA 384/6 (SIA 384/6, 1996) verfolgt.

4.2. Lastverteilung über das Jahr

Die geothermische Ergiebigkeit des Untergrundes ist nicht nur abhängig von den Parametern des Untergrundes und von der Energiemenge die entzogen werden soll, sondern auch vom Lastgang und von der Leistung des Energieentzuges. Die Grundlast (Energiemenge) und die Spitzenlast (Leistung) sind gebäudespezifische Parameter.

Die Herleitung der Grund- und Spitzenlast ist Kapitel 5 zu entnehmen. Im nachfolgenden sind die simulationsrelevanten Parameter zusammengefasst. Die Spitzenlast, das heißt die Leistung mit welcher entzogen wird, ergibt sich aus der bereitgestellten Energiemenge und den Vollbenutzungsstunden (vgl. Tab. 5) der Heizungsanlage in Abhängigkeit der Gebäudetypologie (siehe Kapitel 5).

Tabelle 5: Vollbenutzungsstunden (s. Kapitel 5)

Gebäudetypologie	Vollbenutzungsstunden
Wohngebäude	2100
Nicht-Wohngebäude	1700
Gebäude mit sehr hohem Wärmebedarf	2400
Gebäude mit sehr niedrigem Wärmebedarf	1200

Die Verteilung des Wärmebedarfs über das Jahr ist abhängig vom energetischen Standard der Gebäudehülle und der Nutzungsart des Gebäudes (siehe Kapitel 5.6). Grundsätzlich ergibt sich eine hohe Konzentration des Wärmebedarfs auf die Kernwintermonate.

4.3. Geothermisches Reservoirvolumen

Das über Erdwärmesonden erschließbare geothermische Reservoirvolumen wird bestimmt durch die Erdsondentiefe und die für Erdsondenbohrungen nutzbare Fläche.

4.3.1. Sondentiefe

In Anlehnung an die VDI 4640 Blatt 2 wurde die Standard-Sondentiefe auf 100 m festgelegt (VDI 4640, 2001). Dieser Annahme liegt dabei jedoch keine tatsächliche Restriktion in der Praxis zugrunde. Diese Referenztiefe wurde zum einen gewählt, da die seitens des GD NRW bereitgestellten Wärmeleitfähigkeiten flächendeckend für Gesamt-NRW nur bis zu einer Tiefe von 100 m vorliegen. Zum anderen befindet man sich bis 100 m außerhalb der Anzeigepflicht bei der Bergbehörde.

Abweichend gilt für die in Kap. 3.2. dargestellten Restriktionsflächen eine Sondentiefe von 40 m. Im Rahmen der Simulationsrechnungen wurden somit folgende zwei Varianten betrachtet:

Fall 1: Sondentiefe 100 m für Flächen außerhalb von Restriktionsflächen

Fall 2: Sondentiefe 40 m für Flächen innerhalb von Restriktionsflächen

In der Praxis können sich – abhängig vom standörtlichen Schichtenaufbau (Lage stockwerkstrennender Schichten) und den daraus resultierenden Schutzanforderungen - insbesondere für wasserwirtschaftlich bedeutende Grundwasserleiter individuelle Begrenzungen ergeben, die hier jedoch nicht bzw. nur pauschalierend berücksichtigt werden können (vgl. Kap. 3.2.2).

4.3.2. Theoretisch nutzbare Fläche für Erdwärmesonden

Die theoretische geothermische Ergiebigkeit eines Besitzstückes ist abhängig von der Zahl der Erdwärmesonden, die auf den zugeordneten Freiflächen platziert werden können. Diese wiederum ist abhängig von den vorgegebenen Abstandsregeln sowie der absoluten Größe und der geometrischen Form der nutzbaren Freifläche.

Hierbei sind folgende Abstandsregelungen entsprechend der VDI 4640 als Mindestanforderung einzuhalten:

- Abstand zwischen zwei benachbarten Geothermieranlagen ist mindestens 10 m (VDI 4640, 2010)
- Sondenabstand innerhalb einer Geothermieranlage beträgt bei 100 m tiefen Erdwärmesonden untereinander mindestens 6 m (VDI 4640, 2001)

Aufgrund der großen Anzahl der möglichen Flächengeometrien, die insbesondere nach Heraus schneiden der bebauten Flächenanteile entstanden sind, ist die Zuordnung der Anzahl der Erdwärmesonden für jedes Besitzstück nur über einen pauschalen Ansatz möglich. Es

wurde jeweils aus der im GIS vorliegenden Vieleck-Freifläche des jeweiligen Besitzstückes eine kompakte, quadratische Grundfläche gebildet (s. Abb. 10), wobei die Flächengröße identisch bleibt. Eine ermittelte netto-Grundstücksfreifläche (vgl. Kapitel 3.1) von 100 m² entspricht demnach einem Quadrat mit 10 m Seitenlänge. Bei 400 m² ergibt sich eine Seitenlänge von 20 m.



Abbildung 10: Vereinfachung der Grundstücksgeometrie(Kartengrundlage: Geobasis.NRW)

Entsprechend der Größe der quadratischen Grundfläche wurde dann geprüft, welche Sondenanordnung (Einzelsonde oder Mehrfachanordnung im Sondenfeld) möglich ist. Um den o.g. Abstand zwischen zwei benachbarten Geothermieanlagen von 10 m einhalten zu können, wurde ein Mindestabstand der Sonde zum Seitenrand von 5 m gewählt. Daraus folgt, dass unter diesen Rahmenbedingungen eine unbebaute Fläche mindestens 100 m² groß sein muss (vgl. Abb. 11), um mittels einer Erdwärmesonde geothermisch erschlossen werden zu können.

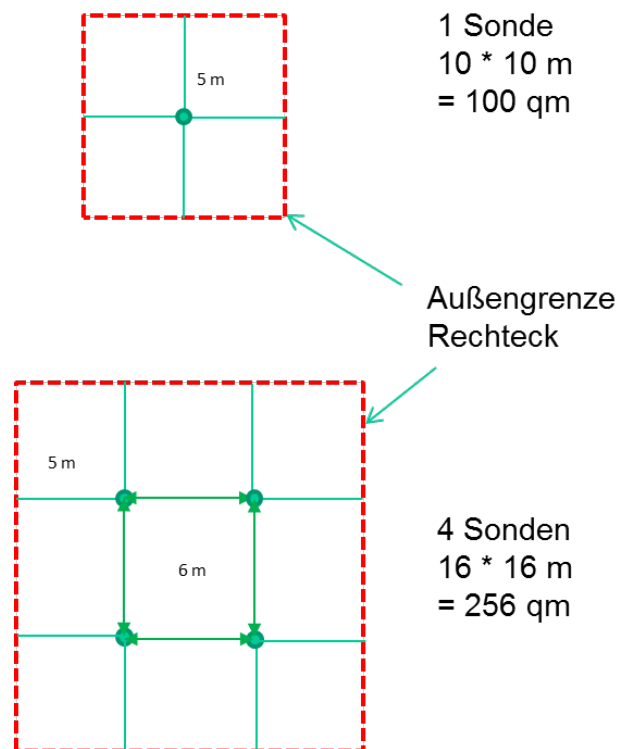


Abbildung 11: Sondenanordnung für eine Einzelsonde bzw. ein Sondenfeld mit 4 Sonden

In der Praxis sind Einzelfälle denkbar, wo auf Flächen $< 100 \text{ m}^2$ eine Erdwärmesonde platziert werden kann, insbesondere wenn die Bohrung sehr nahe am Gebäude abgeteuft wird bzw. aufgrund von benachbarten Verkehrsflächen die Abstandsregelung nicht beachtet werden muss. Im Gegenzug werden einzelne Flächen aufgrund ungünstiger Geometrie auch bei Flächengrößen $> 100 \text{ m}^2$ geothermisch nicht nutzbar sein. Hier ist davon auszugehen, dass sich diese Ungleichgewichte nach einer Aggregation größtenteils wieder ausgleichen werden.

Für die gesamte Bandbreite der ermittelten Nettofreiflächenbeträge wurden insgesamt 40 repräsentative Sondenfeldkonfigurationen ausgewählt, für die jeweils Einzelsimulationsrechnungen durchgeführt wurden. Es handelt sich dabei um alle quadratischen Sondenanordnungen von einer Sonde bis 34×34 Sonden (1156 Sonden) und diverse Zwischenkonfigurationen (s. Anhang 1). Unabhängig von der Größe des Sondenfeldes wurde der Sondenabstandswert von 6 m beibehalten, um unabhängig von der Effizienz durch die gegenseitige Beeinflussung der Sonden den maximal möglichen geothermischen Entzug auf der jeweiligen Fläche ermitteln zu können.

Die oben beschriebene Vorgehensweise wurde anhand von typischen in der Realität vorkommenden Flächenanordnungen validiert. Hier konnte u.a. nachgewiesen werden, dass der pauschale gewählte Ansatz auch bei Extremsituationen gute Übereinstimmungen aufweist.

Nachfolgend ist in Abbildung 12 die Situation für verschiedene Reihenhausbebauungen beispielhaft dargestellt (Gebäude: schattiert). Die Besitzstücke weisen jeweils eine Freifläche (unschattiert) von 100 m^2 auf. Unabhängig von der Grundstücksform (lang gestreckt oder kompakt) kann pro Besitzstück unter Einhaltung der Abstandsvorgaben jeweils eine Erdsonde (blauer Kreis mit 5 m Radius) platziert werden (s. Abb. 12).

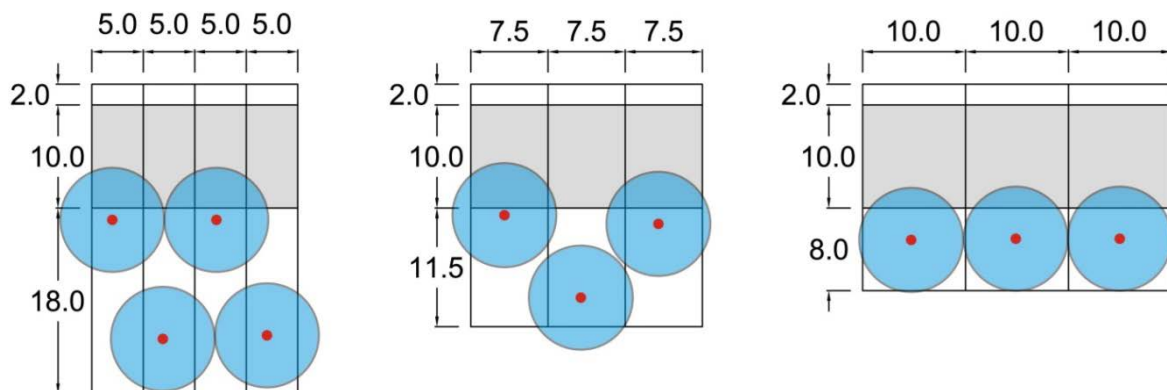


Abbildung 12: Sondenanordnungen bei verschiedenen Reihenhausbebauungen

4.4. Simulationsberechnungen

Nachfolgend werden das verwendete Simulationsprogramm sowie die notwendigen Eingabedaten beschrieben.

4.4.1. Simulationssoftware

Sämtliche Referenzsimulationen zur Ermittlung des theoretischen geothermischen Flächenpotenzials wurden mit dem Simulationsprogramm EED (hier: Earth Energy Designer EED 3.16) durchgeführt.

Für die Durchführung der Referenzsimulation sind neben den in Kapitel 4.1 bis 4.3 bereits beschriebenen variablen Eingabeparameter zahlreiche weitere nachfolgend dargestellte Eingabestandards zu definieren.

4.4.2. Eingabestandards

Die weiteren Eingabestandardwerte für das Simulationsprogramm wurden seitens des Geothermiezentrums entsprechend dem derzeitigen Stand der Technik sowie anhand der Praxiserfahrung verschiedener Experten der projektbegleitenden Arbeitsgruppe ermittelt.

Erdwärmesonden, Bohrloch und Verfüllmaterial

Der Wärmeübergang vom umgebenden Erdreich auf das eingesetzte Wärmeträgerfluid ist abhängig von dem gewählten Erdsondenmaterial, der Bohrlochgeometrie und dem Verfüll-/Verpressmaterial zwischen Erdsonde und Bohrlochwand.

Für die Referenzsimulationen wurde ein Standard-Erdwärmesondenausbau gewählt, wie er aktuell für Erdwärmesondenanlagen bis 100 m Tiefe zum Einsatz kommt (vgl. Abb. 13). Es handelt sich hierbei um sogenannte Doppel-U-Sonden aus Polyethylen (Graf et al., 2013), die aus vier Rohrsträngen mit Rohrdurchmesser von 32 mm, einer Wandstärke von 2,9 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,42 W/mK bestehen.

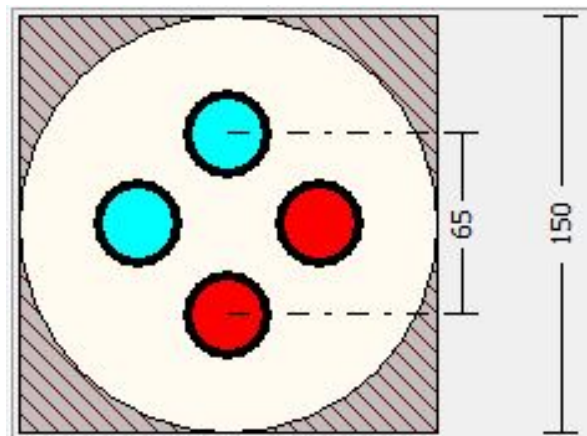


Abbildung 13: Querschnitt der Erdsonde und des Ringraums des Bohrloches

Bezüglich des Bohrlochdurchmessers gibt es derzeit in NRW keine einheitliche Vorgehensweise bzw. behördliche Vorgabe. Um ausreichende Verfülldicken zu erreichen, wird seit einigen Jahren jedoch bei Verwendung von 32 mm-Doppel-U-Sonden von den Unteren Wasserbehörden in NRW vermehrt ein Durchmesser von 150 mm gefordert und auch als Eingabestandard in der vorliegenden Studie festgelegt.

Um zudem eine gegenseitige Beeinflussung zwischen den beiden Sondenvor- und rückläufen zu minimieren, ist ein möglichst großer Sondenrohrmittelabstand zu wählen. Für die Referenzsimulationen wurde der Sondenrohrmittelabstand mit 65 mm festgesetzt.

Verfüllmaterialien werden eingesetzt zur Abdichtung des offenen Bohrlochringraumes sowie zur Verbesserung des Wärmeüberganges zwischen Erdreich und der Erdwärmesonde. Bezüglich der Wärmeleitfähigkeit gibt es derzeit keine einheitliche Vorgehensweise bzw. behördliche Vorgabe in NRW. In der Praxis wird daher immer häufiger thermisch optimiertes Verfüllmaterial mit möglichst hohen Wärmeleitfähigkeiten zur Effizienzsteigerung der Erdwärmesonden eingesetzt. Der Großteil der marktverfügbaren thermisch optimierten Verfüllmaterialien hat eine Wärmeleitfähigkeit von 2,0 W/(m K). Dieser Wert wurde auch in der vorliegenden Studie zum Ansatz gebracht.

Wärmeträgerfluide

Sofern genehmigungsrechtlich vertretbar, kommen in Erdwärmesondenanlagen i.d.R. Wärmeträgerfluide mit Frostschutzmitteln (insbesondere Glykol) zum Einsatz, mit denen es möglich ist die Anlage nahe bzw. unterhalb des Gefrierpunktes zu fahren. Dies steigert die geothermisch nutzbare Temperaturdifferenz und somit die Effizienz der Geothermieanlage deutlich. Letzteres ist jedoch nur bis zu bestimmten Minusgraden des Wärmeträgerfluids sinnvoll, da der Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmepumpe immer größer wird und zu Lasten der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe geht. Des Weiteren müsste ein höherer Frostschutzanteil eingesetzt werden und die Gefahr der Beschädigung des Verfüllmaterials durch Frost-/Tauwechsel würde deutlich zunehmen. Für die vorliegende Potenzialstudie wurde eine minimale mittlere Wärmeträgertemperatur T_{EWSmin} von **-1,5° C** zugrunde gelegt, die sich an der derzeitigen Fassung der Schweizer Norm SIA 384/6 orientiert (SIA 384/6, 1996).

In Erdwärmeeanlagen kommt als Frostschutzmittel üblicherweise Monoethylenglykol zum Einsatz, welcher der Wassergefährdungsklasse (WGK) 1 „schwach wassergefährdend“ zugeordnet ist. Bei Zugrundelegung von T_{EWSmin} von -1,5° C ist nach dem Stand der Technik ein Gemisch aus 75 % Wasser und 25% Monoethylenglykol ausreichend, um die Mindestanforderungen einer Erdwärmeeanlage an den Frostschutz erfüllen zu können.

Verwendet man ausschließlich Wasser als Wärmeträgerfluid, muss die minimale Temperatur am Sondaustritt auf 3°C begrenzt werden (vgl. Abb. 14). D.h. bei einem ΔT von 3K zwischen Sondaus- und eintritt ergibt sich somit eine minimale mittlere Wärmeträgertemperatur von 4,5°C, was zu einer Leistungsreduzierung der Anlage von fast 50 % führt.

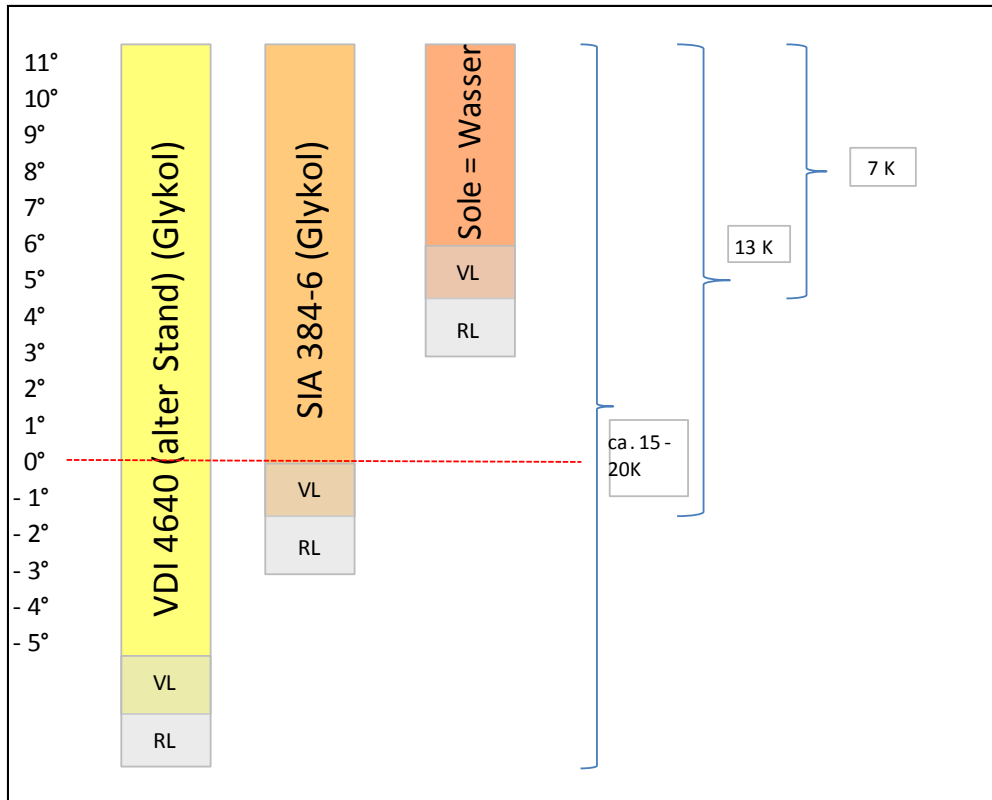


Abbildung 14: Minimale Vor- und Rücklauftemperaturen und nutzbarer Temperaturbereich bei unterschiedlichen Vorgaben

Alle Eingabestandards für die Wärmeträgerfluide können Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 6: Eingabestandards für die Wärmeträgerfluide

Parameter	Wasser mit 25 % Monoethylenglykol	100 % Wasser
minimale mittlere Wärmeträgertemperatur T_{EWSmin} [°C]:	-1,5	4,5
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]:	0,48	0,5720
Spezif. Wärmekapazität [J/(kg K)]:	3.795	4.202
Dichte [kg/m³]:	1.052	1.000
Viskosität [kg / (m s)]:	0,0052	0,001520
Gefrierpunkt [°C]:	-14,0	0,0
Umwälzmenge (l/s)	0,4 (laminares Fließverhalten)	0,12 (laminares Fließverhalten)

Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl ist eine dimensionslose Zahl die aussagt, wie viel Heizungswärme im Verhältnis zum eingesetzten Strom von der Wärmepumpe im Laufe eines ganzen Jahres im

betreffenden Gebäude erzeugt wurde. So bedeutet eine JAZ von 4 z.B., dass die Energie für den Wärmebedarf eines Hauses zu 75 % aus dem Erdreich gewonnen wird und zu 25 % mit dem Strombedarf der Wärmepumpe gedeckt wird.

Auf Grund der Abhängigkeit der JAZ von der Vorlauftemperatur des eingesetzten Heizverteilensystems zeigt sich für die Bestandsimmobilien in NRW ein sehr inhomogenes Bild. Da das Alter der Gebäude und die Vorlauftemperaturen der Verteilsysteme nicht als Datensatz vorhanden sind, musste eine pauschale JAZ für alle Gebäudealter angenommen werden.

Die Basis für den pauschalen Ansatz bilden die Förderbedingungen des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA, 2013) für die Förderung von effizienten Wärmepumpen. Demnach sind Wärmepumpenanlagen in Bestandsgebäuden förderfähig, wenn sie eine JAZ von mindestens 3,8 (bei Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen in Wohngebäuden) aufweisen. Auf dieser Grundlage und aufgrund der Praxiserfahrung der projektbegleitenden Arbeitsgruppe wurde für alle Bestandsgebäude eine JAZ von 3,8 angenommen. Eine weitere Differenzierung erfolgt nicht.

Die Simulationen zur Ermittlung des theoretisch nutzbaren geothermischen Potenzials beziehen sich ausschließlich auf die Leistungsfähigkeit des Untergrundes, d. h. welche Energiemenge kann unter den gegebenen Randbedingungen aus dem Erdreich entzogen werden. Die Energiemenge, die dem Gebäude unter Verwendung einer Wärmepumpe bereitgestellt werden kann, ergibt sich dann unter Berücksichtigung der JAZ der gesamten geothermischen Anlage.

Zeitliche Randbedingungen der Simulation

Als zeitliche Randbedingungen für die Referenzsimulationen sind der Monat der Inbetriebnahme und die Simulationsdauer festzulegen. Hierbei wird der Monat der Inbetriebnahme auf September gesetzt, welches dem Beginn der Heizperiode entspricht. Für die Simulationsdauer = berechnete Betriebsdauer wurden 50 Jahre zugrunde gelegt. Dieser Wert orientiert sich an derzeitige Fassung der Schweizer Norm SIA 384/6 (SIA 384/6, 1996).

Im ausschließlichen Heizbetrieb führt der Betrieb einer Wärmepumpenanlage, sofern keine ausreichende Regeneration außerhalb der Heizperiode erfolgt, zu einer stetigen Auskühlung des Untergrundes, bis ein Gleichgewichtszustand zwischen Energieentzug und Wärmenachführung erreicht wird. Dieser Zustand stellt sich in der Regel nach 15 bis 30 Jahren ein.

4.5. Simulationsergebnisse

Die Simulationen ergeben die geothermische Ergiebigkeit des Untergrundes, das heißt die Leistung bzw. Wärmemenge, die aus der Erde entzogen werden kann. Innerhalb des Gebäudes setzt sich dann die Heizleistung bzw. die Wärmemenge aus der Umweltenergie aus der Erde und der zugeführten elektrischen Energie, entsprechend der Jahresarbeitszahl zusammen.

Im Rahmen der Studie wurden insgesamt 4212 Ergebnisse erzeugt. Diese setzen sich aus 39 Sondenfeldkonfigurationen, neun Wärmeleitfähigkeitsklassen, vier Objektschlüsseln und

drei Sondenarten (100 m, Sole; 40 m, Sole; 40 m, Wasser) zusammen. Die einzelne Simulation wurde mit dem Ziel durchgeführt, dass die mittlere Soletemperatur nicht unter $-1,5^{\circ}\text{C}$ (bzw. bei Wasser als Solemittel $4,5^{\circ}\text{C}$) fällt.

Beispielhaft ist nachfolgend das Ergebnisdiagramm für 16 Sonden, 100 m Tiefe und einer Wärmeleitfähigkeit von $2,5 \text{ W/mK}$ für die Wohnnutzung dargestellt (Abb. 15).

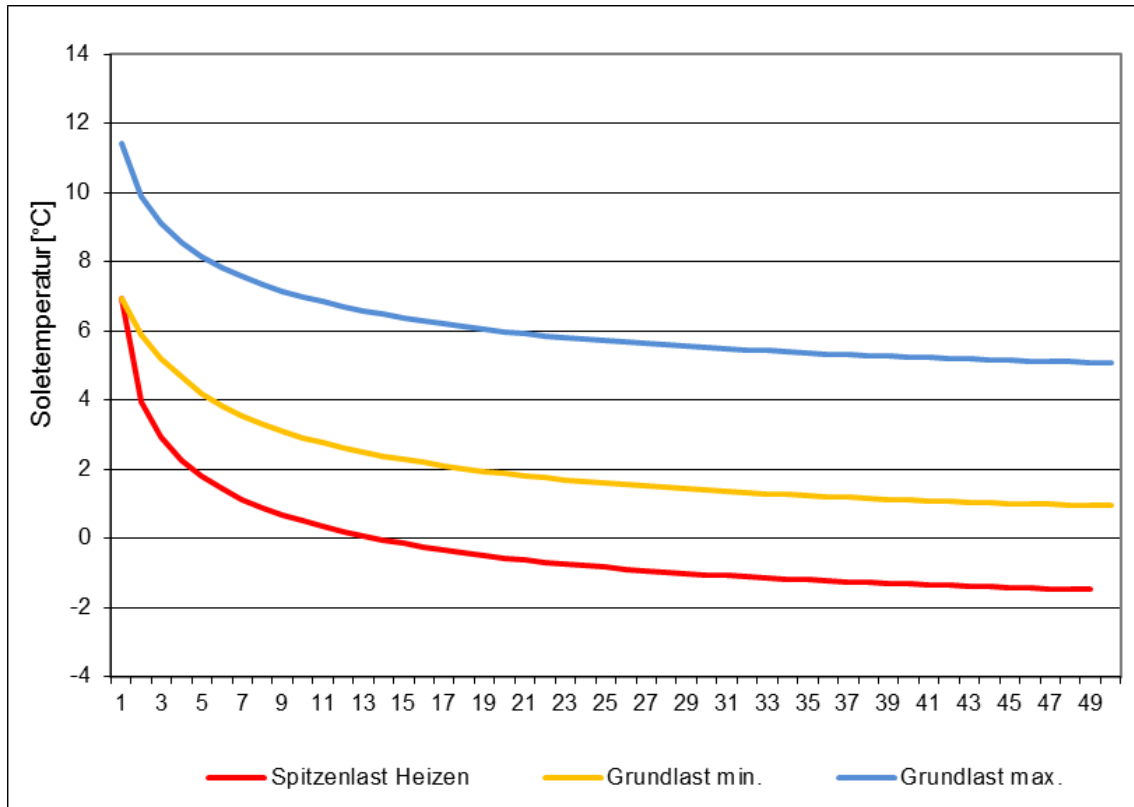


Abbildung 15: Mittlere Soletemperaturen über den gesamten Simulationszeitraum (50 Jahre)

Das Diagramm zeigt die mittleren Soletemperaturen für die Grundlast und die Spitzenlast über einen Zeitraum von 50 Jahren an. Die mittlere Soletemperatur stellt hierbei das Mittel aus Vorlauf- und Rücklauf-temperatur der Erdsondenanlage dar. Die Grundlastkurven (blau und gelb) zeigen die jeweils minimale und maximale mittlere Soletemperatur im Jahr. Die rote Spitzenlastkurve zeigt die jeweils geringste mittlere Soletemperatur im Jahr an. Diese Kurve veranschaulicht den realitätsnahen minimalen Temperaturverlauf und ist daher maßgeblich für die Ermittlung der geothermischen Ergiebigkeit.

Durch die Simulationen konnten zudem die Abhängigkeiten der Parameter zueinander gut abgebildet werden. So ergaben die Berechnungen unter anderem, dass die geothermische Ergiebigkeit von der Wärmeleitfähigkeit $1,0 \text{ W/mK}$ bis zur Wärmeleitfähigkeit $3,5 \text{ W/mK}$ um ca. 100% ansteigt. Eine Tiefenbegrenzung von 40 Metern führte zu einer Reduktion der geothermischen Ergiebigkeit um das zweifache. Bei einer Tiefenbegrenzung von 40 Metern und dem Einsatz von Wasser als Solemittel sogar um das vierfache.

Als Ergebnis erhält man für alle betrachteten Besitzstücke in NRW das theoretisch nutzbare geothermische Potential, welches unabhängig vom Wärmebedarf des Gebäudes ist.

5. Ermittlung Gebäudebedarfswerte

Die Ermittlung des technisch nutzbaren geothermischen Potenzials beruht auf dem Verscheiden des theoretischen geothermischen Potenzials mit dem Wärmebedarf der Gebäude. Nachfolgend wird der Wärmebedarf, die Verteilung über das Jahr, der Warmwasserbedarf und die Umrechnung vom spezifischen Wärmebedarf pro m² beheizte Fläche auf den spezifischen Wärmebedarf pro m³ Bruttogebäudevolumen dargestellt.

5.1. Wärmebedarf Wohngebäude

Der Wärmebedarf der Gebäude ist abhängig vom Dämmstandard, dem Standort und der Nutzung. Eine Auswertung der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. zeigt, dass 55% der Ein- und Zweifamilienhäuser sowie kleinerer Mehrfamilienhäuser in Deutschland vor 1970 erbaut wurden, daher das Durchschnittsalter der Gebäude bei ca. 45 Jahren liegt (ARGE, 2011).

Unberücksichtigt sind hierbei die energetischen Ertüchtigungen im Laufe der Nutzung der Gebäude. Das „energetische Alter“ (unter Berücksichtigung aller nachträglich durchgeführten energetischen Ertüchtigungen) der Gebäude ist somit wesentlich jünger einzuschätzen, als das Alter der primären Bausubstanz. Eine Studie des Bremer Energie Instituts und des Instituts für Wohnen und Umwelt ergibt eine Quote der nachträglichen Dämmung von Außenbauteilen bei Gebäuden vor 1978 von ca. 25% (Nikolaus et al., 2010). Auf Grundlage dieses Aspektes und der Diskussion innerhalb der begleitenden Arbeitsgruppe wurde das durchschnittliche energetische Alter aller Bestandsgebäude pauschal der Wärmeschutzverordnung 84 zugeordnet.

Die Untersuchungen zum Heizwärmebedarf auf Basis der Wärmeschutzverordnung 84 sind vergleichsweise heterogen. Die aus zahlreichen Studien (unterschiedlicher Herangehensweise und unterschiedlicher Datengrundlage) vorliegenden Werte liegen in einem Bereich von 120 bis 180 kWh/m²a. In der Studie wurde darum ein Mittelwert von 150 kWh/m²a zu Grunde gelegt. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass bei einem geplanten Einsatz einer Wärmepumpenanlage die energetische Qualität des Gebäudes zusätzlich auf dem Prüfstand steht und zumindest kleinräumige Optimierungen vorgenommen werden (z. B. Isolation der Warmwasserleitungen, energieeffizienteres Nutzerverhalten).

Die Ermittlung der spezifischen Heizlast der Gebäude erfolgt mit Hilfe der Vollbenutzungsstunden. Auch hier ergibt sich eine große Bandbreite an berechneten und empirisch ermittelten Werten. Zu nennen sind hier z.B. die VDI 2076 Blatt 2 (VDI 2076, 1993) und der Kennziffernkatalog der Energiewirtschaft (Kz, 2004) mit nachfolgenden Werten (s. Tab. 7).

Tabelle 7: Vollbenutzungsstunden für verschiedene Gebäudenutzungen

Gebäude	b_{VH} [h/a]	
	VDI 2067 Blatt 2	Kennziffernkatalog der Energiewirtschaft (Referenzstandort Düsseldorf)
Einfamilienhaus	1700 - 2100	1850
Mehrfamilienhaus	1800 - 2100	1930
Bürogebäude	1500 - 1900	2110
Krankenhäuser	1900 - 2500	2620

Im Rahmen einer Studie des internationalen Geothermiezentrums wurden mit Hilfe von thermischen Gebäudesimulationen zudem die Vollbenutzungsstunden für unterschiedliche Dämmstandards von Wohngebäuden ermittelt (s. Abb. 16).

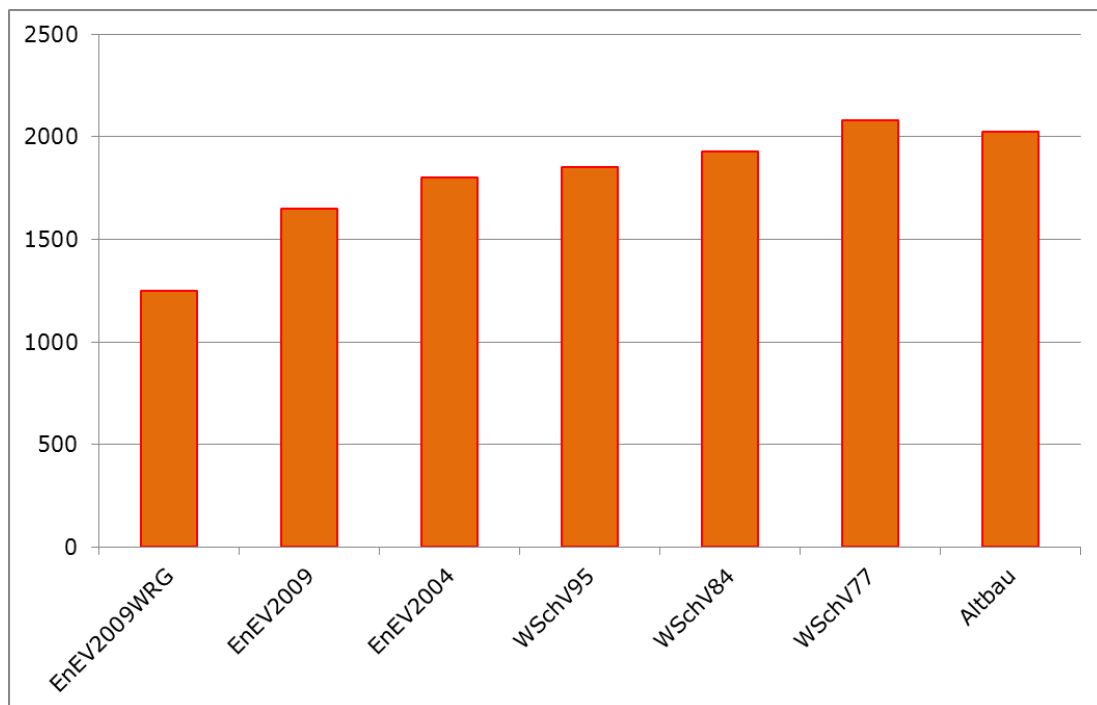


Abbildung 16: Vollbenutzungsstunden für unterschiedliche Dämmstandards von Gebäuden (Eickler, 2010)

Der Wert für die WSchV 84 bewegt sich im Rahmen der in der Literatur genannten Bandbreiten und wurde daher als Mittelwert für alle Wohngebäude angenommen. Im Rahmen dieser Studie wurden daher 1900 Vollbenutzungsstunden als Referenzwert für die WSchV 84 über alle Wohngebäude angenommen.

Der Warmwasserbedarf ist primär von der Anzahl der Bewohner abhängig. Die Abhängigkeit zum Dämmstandard ist marginal. Nach dem Statistischen Bundesamt beträgt die Wohnfläche je Einwohner im Jahre 2011 in NRW 41,2 m². Der Energiebedarf für Warmwasser liegt im Mittel bei 600 kWh pro Person. Der spezifische Warmwasserbedarf liegt somit bei

14,6 kWh/(m²*a). Alternativ kann der Energiebedarf für Warmwasser auch der EnEV 2009 entnommen werden. Dieser liegt mit 12,5 kWh/(m²*a) etwas niedriger. In Anbetracht des weiter ansteigenden Komfort- bzw. Wellnessbedarfs wurden 15 kWh/m²a Warmwasserbedarf, was 10 % des Heizwärmebedarfs entspricht, zum Ansatz gebracht. Die Vollbenutzungsstunden inklusive des Warmwassers steigen somit um ca. 10% von 1900 h auf 2100 h an. Zusammenfassend sind die Werte in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Parameter für Wohngebäude

Parameter Wohngebäude	Wert
Spezifischer Heizwärmebedarf	150 kWh/m ² a
Spezifische Heizleistung	79 W/m ²
Spezifischer Warmwasserbedarf	15 kWh/m ² a
Vollbenutzungsstunden (inkl. Warmwasser)	2100 h/a

5.2. Wärmebedarf Nicht-Wohngebäude

„Für Nichtwohngebäude gibt es bisher keine vergleichbaren Werkzeuge. Der Bestand von Nichtwohngebäuden ist insbesondere durch die unterschiedlichen Nutzungen und den großen Einfluss der technischen Gebäudeausrüstung auf den Energieverbrauch deutlich heterogener als der von Wohngebäuden.“ (IWU, 2012)

Der Heizwärmebedarf der Nicht-Wohngebäude wurde daher analog zu den Wohngebäuden berechnet. Lediglich die Heizlast wird auf Grund der geringeren Vollbenutzungsstunden höher ausfallen, welches die längeren Absenckphasen (am Wochenende) und die daraus resultierende Wiederaufheizleistung widerspiegelt. Der Bedarf wurde somit auch hier mit 150 kWh/m²a angenommen. Die Vollbenutzungsstunden liegen bei 1700 h. Somit ergeben sich die in Tabelle 9 dargestellten Parameter für Nicht-Wohngebäude. Eine zentrale Warmwasserbereitung ist im Bereich der Nicht-Wohngebäude nicht üblich bzw. dezentral und wurde daher nicht berücksichtigt.

Tabelle 9: Parameter für Nicht-Wohngebäude

Parameter Nicht-Wohngebäude	Wert
Spezifischer Heizwärmebedarf	150 kWh/m ² a
Spezifische Heizleistung	88 W/m ²
Vollbenutzungsstunden	1700 h/a

5.3. Wärmebedarf von Gebäuden mit gesonderter Nutzung

Neben Gebäuden mit klassischer Nutzung (Wohn- und Nicht-Wohngebäude) lassen sich innerhalb der zur Verfügung stehenden Objektschlüssel Gebäude mit einem erhöhten Wärmebedarf identifizieren. Zu diesen Gebäuden zählen z. B. Krankenhäuser, Altenheime und Hallenbäder. Eine Datengrundlage mit Durchschnittswerten für diese Gebäudetypen ist nicht gegeben. Anhand von Einzeldarstellungen für Krankenhäuser z. B. vom Fraunhofer-Institut (ASUE, 2010) oder der Energieagentur NRW (Tippkötter et al., 2009) lässt sich ein Wärmebedarf (Heizwärme, Warmwasser) von durchschnittlich 300 kWh/m²a ermitteln. Dieser Wert wurde für alle Gebäudetypen mit erhöhtem Wärmebedarf angenommen. Die Vollbenutzungsstunden wurden in Anlehnung an die Werte der Tabelle 7 mit 2400 h angesetzt. Die Gebäudeklasse wurde demnach mit folgenden Randbedingungen (Tab. 10) differenziert betrachtet:

Tabelle 10: Parameter für Gebäude mit sehr hohem Wärmebedarf

Parameter Gebäudemit sehr hohem Wärmebedarf	Wert
Spezifischer Heizwärmebedarf	300 kWh/m ² a
Spezifische Heizleistung	125 W/m ²
Vollbenutzungsstunden	2400 h/a

Analog zu den Gebäuden mit erhöhtem Wärmebedarf lassen sich Gebäude mit einem besonders geringen Wärmebedarf erkennen. Dazu zählen z. B. Veranstaltungsgebäude und Gebäude mit niedrigen Innentemperaturen. Sowohl der Wärmebedarf als auch die Vollbenutzungsstunden mussten auf Grund fehlender Referenzwerte abgeschätzt werden. Die Gebäudegruppe wurde mit nachfolgenden Parametern (Tab. 11) in die Auswertung eingebracht.

Tabelle 11: Parameter für Gebäude mit geringem Wärmebedarf

Parameter Gebäude mit geringem Wärmebedarf	Wert
Spezifischer Heizwärmebedarf	75 kWh/m ² a
Spezifische Heizleistung	62,5 W/m ²
Vollbenutzungsstunden	1200 h/a

5.4. Klimatischer Einfluss auf den Wärmebedarf

Der Wärmebedarf eines Gebäudes ist primär abhängig von der Differenz zwischen der Temperatur im Gebäude und der Temperatur der Außenluft. Je nach Lage des Gebäudes (in erster Linie Höhenlage) erhöht oder verkleinert sich diese Differenz, sodass analog der Wärmebedarf des Gebäudes ansteigt oder sinkt. Dieser Zusammenhang spiegelt sich in der Berechnung der Heizlast nach DIN EN 12831 wieder (DIN EN 12831, 2003). Der U-Wert der

Wärmeübertragenden Hüllfläche des Gebäudes wird mit der Differenz der mittleren Norminnentemperatur (in der Regel 20°C) und der Normaußentemperatur (in NRW im Mittel ca. -10°C) multipliziert. Dies ergibt im Mittel pro Grad Celsius Temperaturdifferenz eine Änderung der Heizlast um 3,33%. Dieser Zusammenhang wurde für die Anpassung des Wärmebedarfs der Gebäude in Analogie verwendet.

Die mittleren Jahrestemperaturen in NRW liegen zwischen 5°C und 12°C (LANUV, 2013). Die ermittelten Wärmebedarfe der Gebäudeklassen beziehen sich auf eine Referenztemperatur (mittlere Jahrestemperatur) von 10°C. Auf Basis der flächendeckend hinterlegten mittleren Jahrestemperaturen erfolgt für jedes Gebäude eine Anpassung des Heizwärmebedarfs in Abhängigkeit der jeweiligen Außentemperatur um 3,33% pro Grad Celsius. Dies ergibt bei einer minimalen mittleren Außentemperatur von 5°C einen Anstieg des Wärmebedarfs um 16,65% und bei einer maximalen mittleren Lufttemperatur von 12°C eine Verringerung des Wärmebedarfs um 6,66%.

5.5. Umrechnung Bruttogebäudevolumen – Beheizte Fläche

Die Gebäudegröße wurde innerhalb der GIS-Bearbeitung als brutto Gebäudevolumen (über die Außenhülle berechnet) bereitgestellt. Der spezifische Wärmebedarf der Gebäude ist allerdings bezogen auf den Quadratmeter beheizte Fläche ermittelt worden. Somit ist eine Umrechnung von Bruttogebäudevolumen auf beheizte Gebäudefläche notwendig. Die Umrechnung erfolgt in Anlehnung an die EnEV 2009. Die Umrechnung auf das beheizte Gebäudevolumen erfolgt daher über den Faktor 0,76 für Wohngebäude und 0,8 für Nicht-Wohngebäude und die Umrechnung von Kubikmeter auf Quadratmeter beheizte Fläche über den Faktor 0,32 (dies entspricht einer mittleren Geschosshöhe von 3,12 m). Bei Wohngebäuden werden die Geschosshöhen durchschnittlich etwas geringer und bei Nicht-Wohngebäuden etwas höher sein.

5.6. Verteilung Wärmebedarf

Die Jahresverteilung des Wärmebedarfs ergibt sich analog zu den Vollbenutzungsstunden. Auch hier wurden Gebäude des Dämmstandards „Wärmeschutzverordnung 84“ als Referenzgebäude herangezogen. Bei moderneren Gebäuden ergibt sich eine Konzentration des Wärmebedarfs auf die Kernwintermonate. Bei älteren Gebäuden zeigt sich eine gleichmäßigere Verteilung innerhalb der Heizperiode (vgl. Abb. 17). Diese Werte wurden für die Wohngebäude auf den Dämmstandard „Wärmeschutzverordnung 84“ umgerechnet. Zudem wurde ein über das Jahr annähernd gleichmäßiger Warmwasserverbrauch hinzugerechnet.

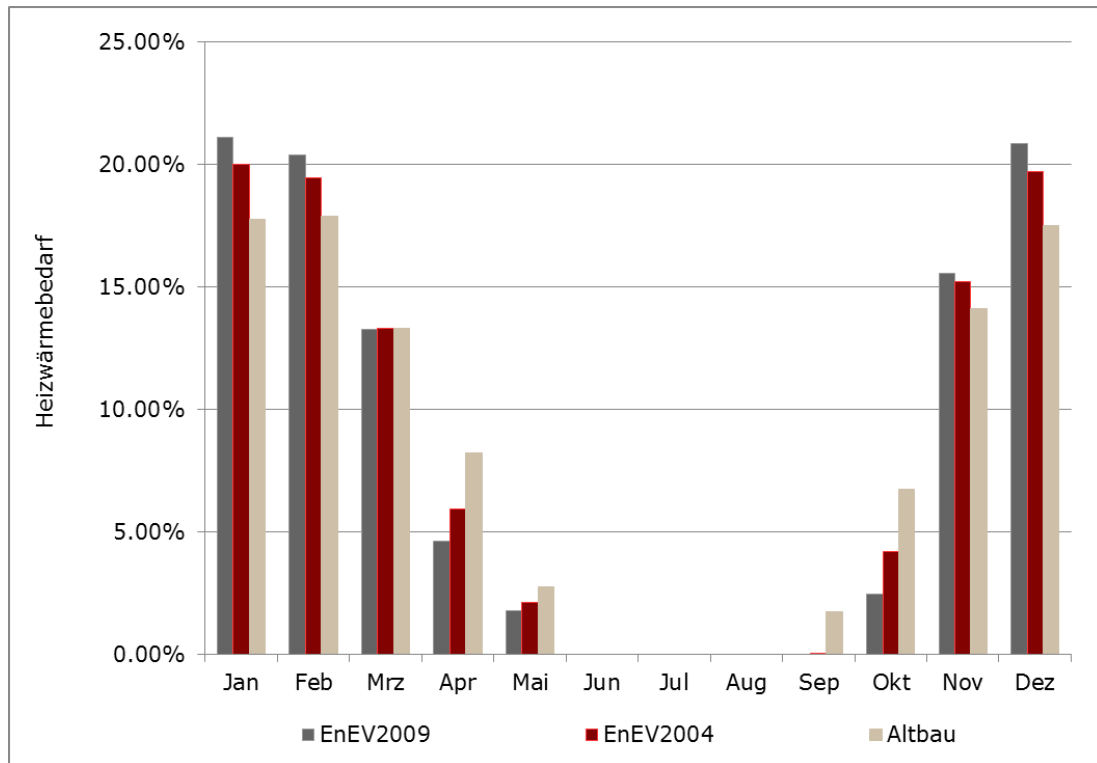


Abbildung 17: Prozentuale Verteilung des Heizwärmebedarfs über das Jahr unterschiedlicher Dämmstandards von Gebäuden (Eicker, 2010)

Bei Nicht-Wohngebäuden und Gebäuden mit gesonderter Nutzung ist die Verteilung des Wärmebedarfs über das Jahr ähnlich zu dem der Wohngebäude. Der über das Jahr gleichbleibende Warmwasserbedarf fällt jedoch weg.

5.7. Ergebnis Wärmebedarf

Für die betrachteten Gebäude in NRW (Wohngebäude, Nichtwohngebäude und gesonderte Gebäude) wurde ein Gesamtwärmebedarf von **271.1 TWh/a** ermittelt. Das jährliche Potenzial der Neubauten beläuft sich auf **0,4256 TWh/a**.

In Abbildung 18 sind die regionalisierten Werte pro Gemeinde dargestellt. Dabei spiegeln sich die unterschiedlichen Bevölkerungszahlen der Gemeinden auch im Wärmebedarf wider. So haben die beiden einwohnerstärksten Städte Köln und Düsseldorf mit 12.820 GWh/a und 9.418 GWh/a den höchsten Wärmebedarf in NRW. Den niedrigsten Wärmebedarf haben die Gemeinden Heimbach mit 81,5 GWh/a und Dahlem mit 81,9 GWh/a.

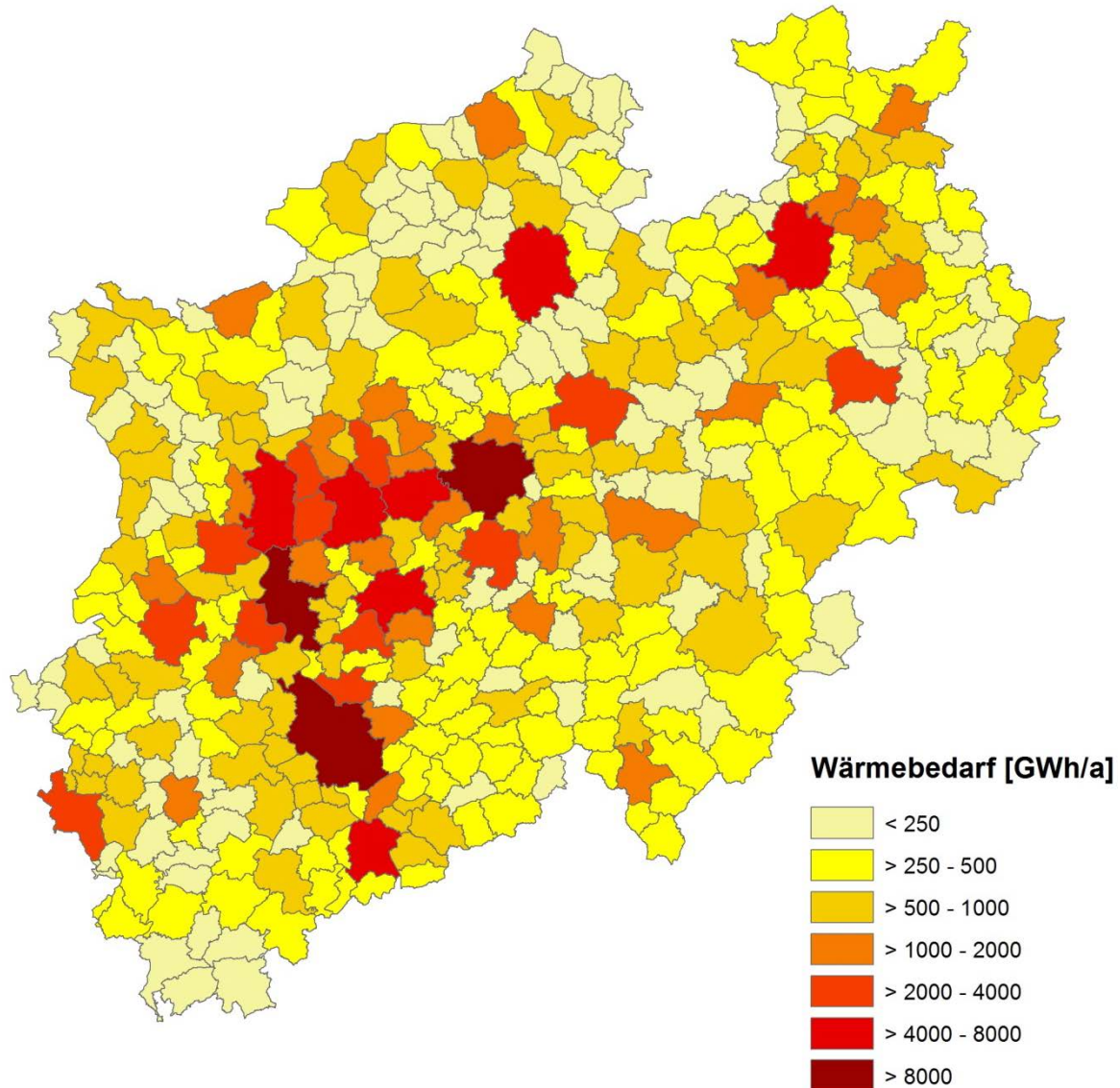


Abbildung 18: Wärmebedarf der Gemeinden

Legt man eine Kennzahl fest und betrachtet den spezifischen Wärmebedarf pro Einwohner (IT.NRW, 2011) im Jahr, so lassen sich andere Einflüsse feststellen (vgl. Abb. 19). Den höchsten spezifischen Wärmebedarf weisen die eher ländlich geprägten Regionen auf. Dabei grenzen sich nochmal die Regionen in den höheren Lagen des Sauerlands leicht ab. Diese Regionen weisen den höchsten spezifischen Wärmebedarf auf, da sich hier der äußere Temperatureinfluss, also die geringere mittlere Jahrestemperatur widerspiegelt. Städtisch geprägte Regionen haben tendenziell einen geringeren spezifischen Wärmebedarf, da durch die dichte Bebauung auch die Wohnfläche pro Einwohner geringer ist als in ländlich geprägten Regionen.

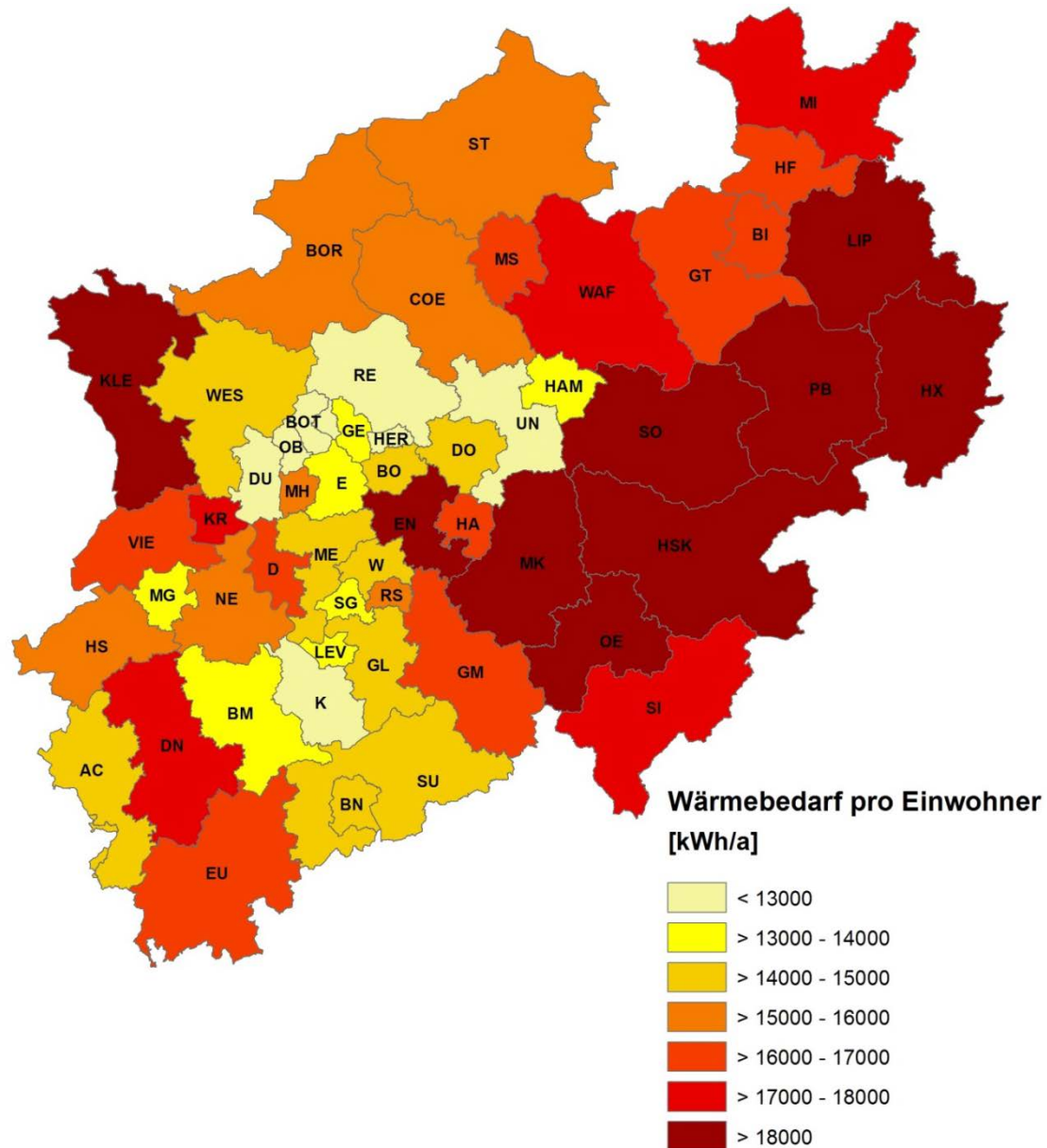


Abbildung 19: Wärmebedarf pro Einwohner (Kreisebene)

Die Bedarfszahlen stimmen NRW-weit betrachtet vergleichsweise gut mit der vorliegenden Statistik des Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) zum Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher (incl. Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher) der Verbrauchsjahre 2000 – 2010 überein (IT NRW, 2012). Diese Statistik zeigt Verbrauchswerte von 229,9 TWh/a bis 280,3 TWh/a (mit Strom) bzw. von 160,7 TWh/a bis 208,2 TWh/a (ohne Strom) auf. Es ist davon auszugehen, dass die in der vorliegenden Statistik angegebenen Energiemengen der verschiedenen Energieträger nahezu ausschließlich zum Heizen verwendet werden. Zusätzlich ist noch ein kleinerer Anteil des angegebenen Stromverbrauches für Wärmepumpen, Nachtspeicherheizung etc. hinzuzurechnen.

Bezogen auf die mittleren Endenergieverbräuche für den Zeitraum 2000 – 2010 liegen die im Rahmen der Studie verwendeten Wärmebedarfszahlen etwas höher, welches die zwar konservative aber angemessene Wahl der Berechnungsansätze belegt, da so der ermittelte Deckungsanteil für eine geothermische Wärmeversorgung geringer ausfällt.

6. Ermittlung des technisch nutzbaren geothermischen Potenzials

Die Ermittlung des technisch nutzbaren geothermischen Potenzials erfolgt mittels der Verschneidung des Wärmebedarfs der Gebäude (vgl. Kap. 5) und des theoretisch nutzbaren geothermischen Potenzials (Ertrag) (vgl. Kap. 4) unter Berücksichtigung der JAZ (siehe Kapitel 4.4.2). Der jeweils kleinere Wert ist maßgeblich, so dass das höchste Potenzial eines Besitzstückes maximal dem Wärmebedarf entsprechen kann. Um das technische Potenzial zu nutzen, muss also immer zusätzlich zu der Energiemenge aus dem Erdreich Energie (in der Regel Strom) für die Wärmepumpe zugeführt werden. Neben den internen Verarbeitungsschritten sind die bereitgestellten Daten aus unterschiedlichen Quellen Grundlage der Untersuchung. Die Verarbeitung dieser Daten im Gesamtprozess der Potenzialermittlung ist in nachfolgendem Fließschema (Abb. 20) detailliert dargestellt.

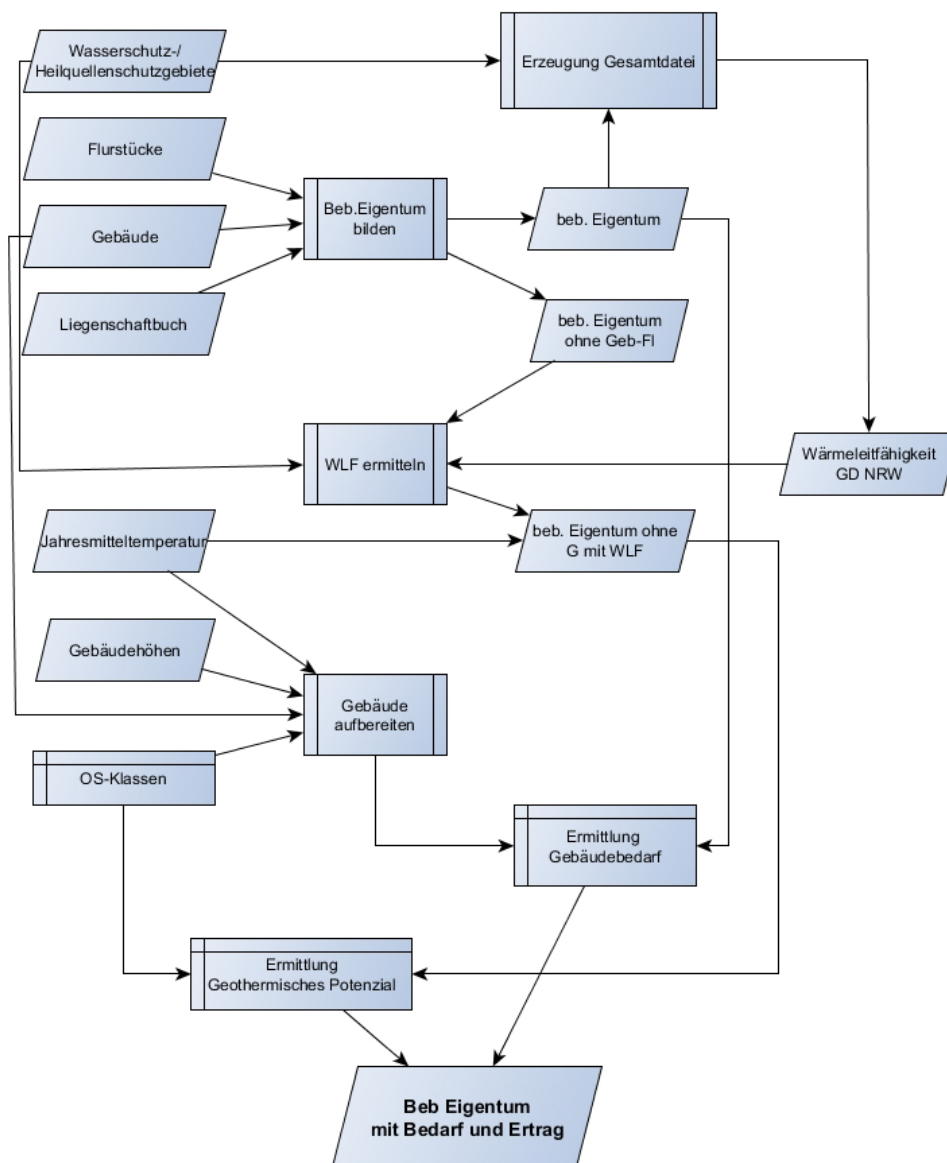


Abbildung 20: GIS-gestützte Verarbeitungsschritte zur Ermittlung der bebauten Eigentumsflächen mit Bedarfs- und Ertragsinformation

Am Ende der dargestellten Arbeitsschritte steht für jede bebaute Besitzeinheit das technisch nutzbare geothermische Potenzial sowie der Wärmebedarf der Gebäude zur Verfügung. Ein Abgleich dieses Potenzials mit dem Wärmebedarf der Gebäude gibt dann den prozentualen Deckungsanteil der Wärmeversorgung über die oberflächennahe Geothermie wieder. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 für einen kleinräumlichen Ausschnitt beispielhaft dargestellt.

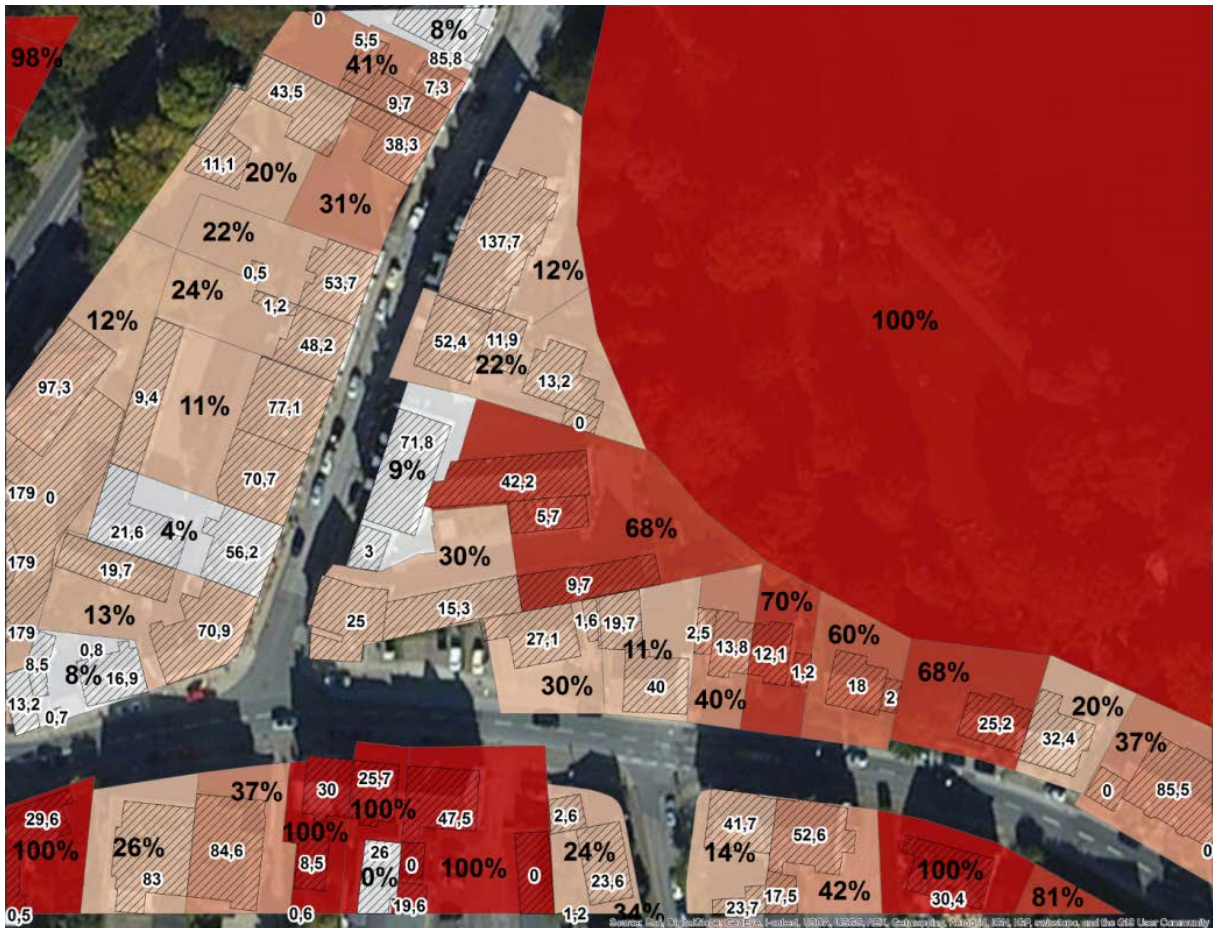


Abbildung 21: Darstellung des Wärmebedarfs der Gebäude (in MWh/a) und der Besitzeinheiten sowie der prozentualen Abdeckung durch das vorhandene geothermische Potenzial (Luftbild: Esri)

Es zeigt sich, dass der Abdeckungsgrad mit zunehmender Bebauungsdichte abnimmt. Andererseits weisen selbst große Besitzstücke, bei denen der Wärmebedarf der Gebäude zu 100 % gedeckt werden kann, nur ein vergleichsweise geringes geothermisches Potenzial auf. Hier zeigt sich die Abhängigkeit des technisch nutzbaren Potenzials vom Wärmebedarf eines Besitzstücks.

6.1. Ergebnisse auf Ebene der Verwaltungseinheiten

In der vorliegenden Potenzialstudie wird jeder Verwaltungseinheit in NRW ein Potenzial zugewiesen. Die Ergebnisse aus den einzelnen Besitzeinheiten werden darum auf die verschiedenen Verwaltungsebenen Nordrhein-Westfalens aufaddiert. Eine genaue Auflistung aller Gemeinden und Kreise ist Anhang 2 und 3 zu entnehmen.

6.1.1. Gemeinden

Die nachfolgende Grafik (Abb. 22) zeigt für jede Gemeinde das technisch nutzbare geothermische Potenzial für das Szenario A.

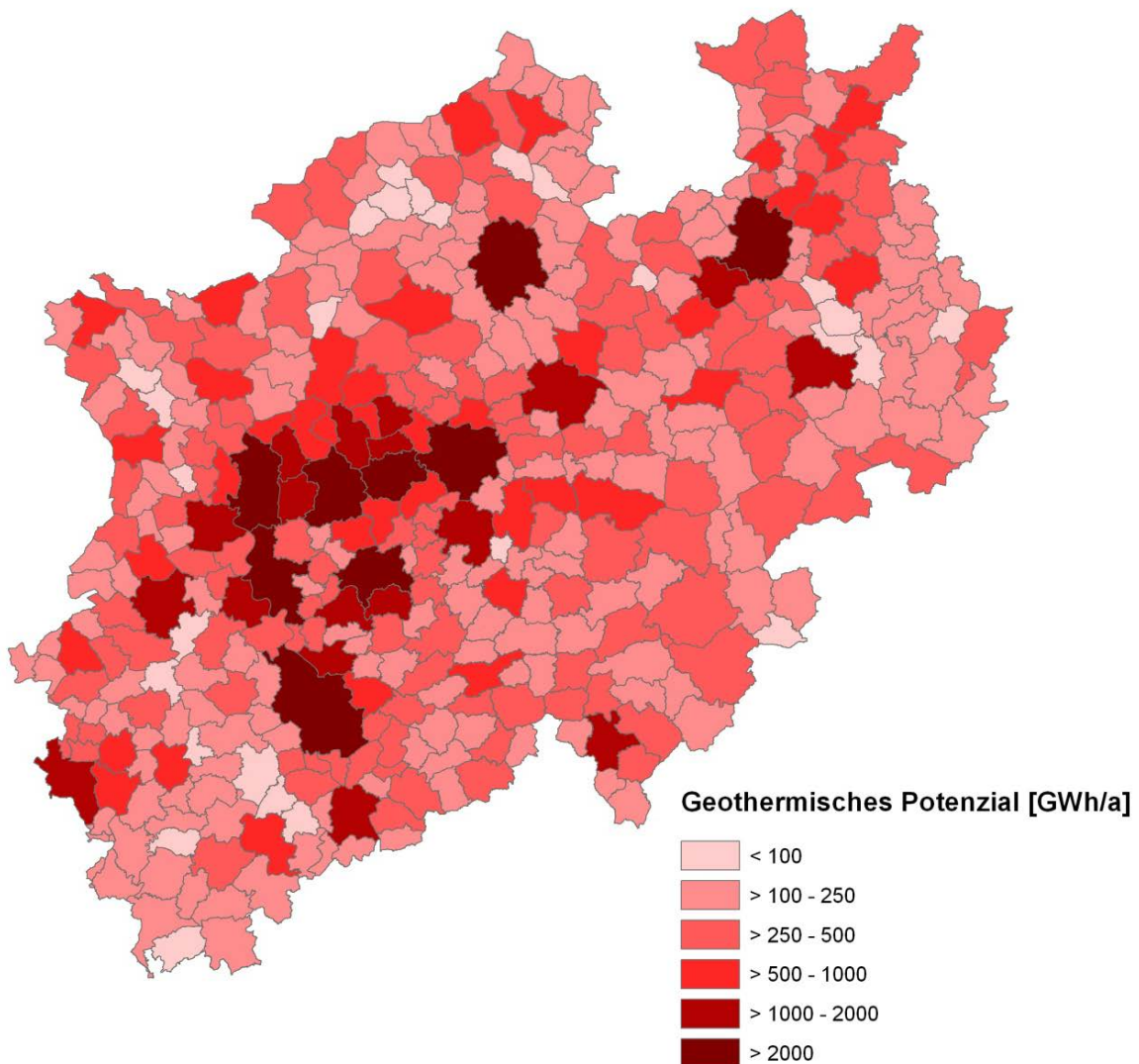


Abbildung 22: Technisch nutzbares geothermisches Potenzial für die Gemeinden (Szenario A)

Da der Wärmebedarf maßgeblich für das ermittelte Potenzial ist, ist das technische Potenzial in den Großstädten durch die hohe Bevölkerungsanzahl am höchsten. Besitzstücke in ländlicheren Gemeinden bieten zwar mehr Fläche um Erdwärmesonden abzuteufen, jedoch ist

der Wärmebedarf durch die geringere Bevölkerungsanzahl deutlich geringer als in Großstädten. Am höchsten ist das geothermische Potenzial für das Szenario A in Essen (4.248 GWh/a) und Köln (3.816 GWh/a), am niedrigsten in Weilerswist (33,3 GWh/a) und Erfstadt (44,5 GWh/a).

Betrachtet man nun für jede Gemeinde den Deckungsanteil des geothermischen Potenzials im Vergleich zum Wärmebedarf für das Szenario A so ergibt sich ein leicht anderes Bild (s. Abb. 23).

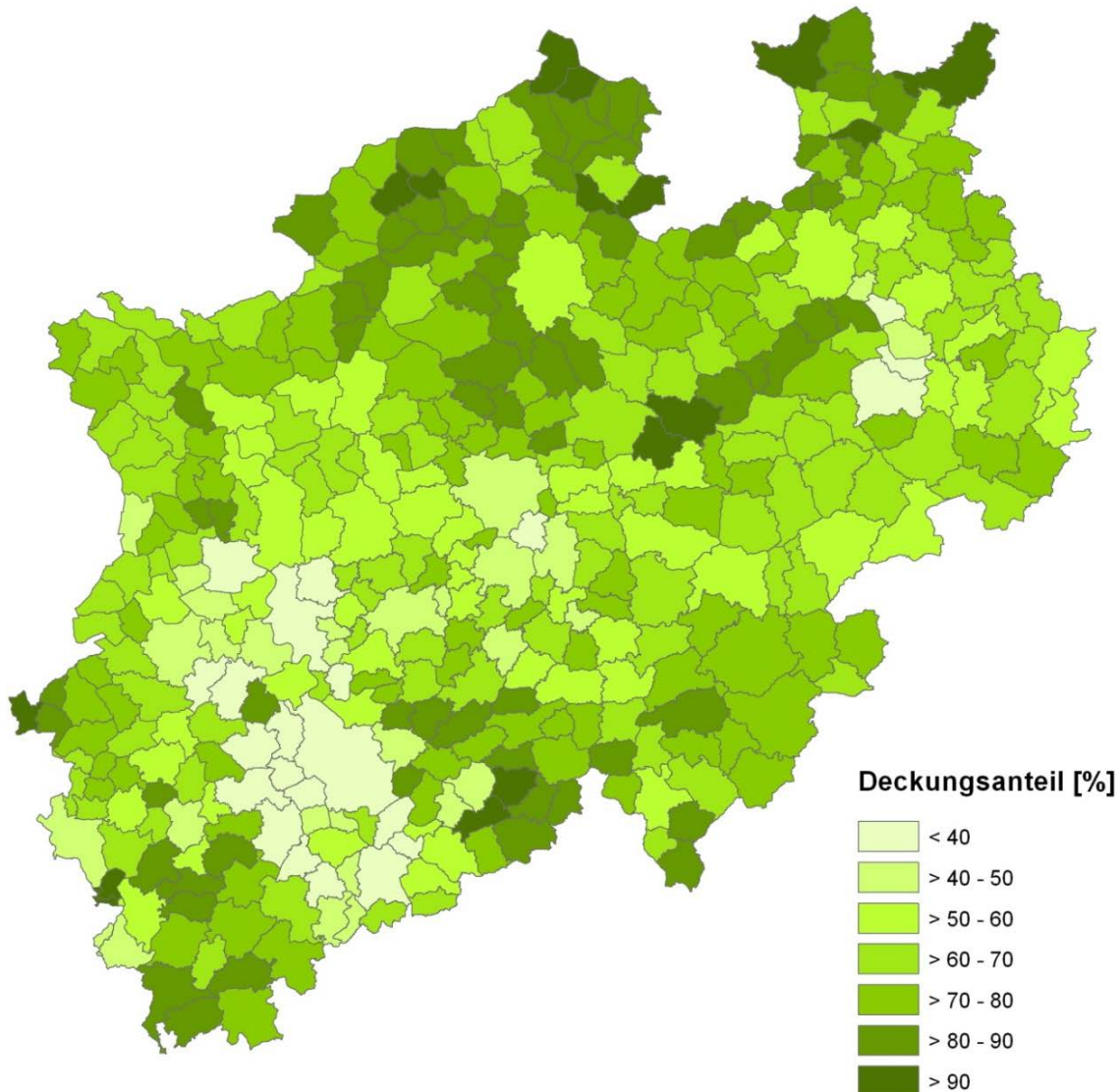


Abbildung 23: Prozentualer Deckungsanteil für die Gemeinden (Szenario A)

Dabei ist deutlich die unterschiedliche Bebauungs- sowie Bevölkerungsdichte erkennbar. So weisen die Großstädte Nordrhein-Westfalens (z.B. Köln, Düsseldorf) durch die hohe Bevölkerungszahl einen hohen Wärmebedarf auf. Gleichzeitig ist durch die große Bebauungsdichte weniger Platz zum abteufen der Erdwärmesonden vorhanden. Durch diese Faktoren kommt ein eher geringerer Deckungsanteil zustande, obwohl das technisch nutzbare Potenzial sehr hoch sein kann. Bei den kleineren und ländlicheren Gemeinden ist dies genau um-

gekehrt der Fall, so dass dort ein wesentlich höherer Deckungsanteil herrscht. Die Bandbreite liegt dabei zwischen unter 7,4 % (Erfstadt) und 97 % (Hopsten) Deckungsanteil. Großstädte wie z.B. Düsseldorf (29,4 %) oder Köln (29,8 %) weisen daher einen eher geringeren Deckungsanteil auf, während ländliche Gemeinden wie z.B. Lippetal (95,5 %) oder Welver (94,3 %) einen hohen Deckungsanteil aufweisen.

6.1.2. Kreise

Die nachfolgende Grafik (Abb. 24) zeigt nun für jeden Kreis das technisch nutzbare geothermische Potenzial für das Szenario A.

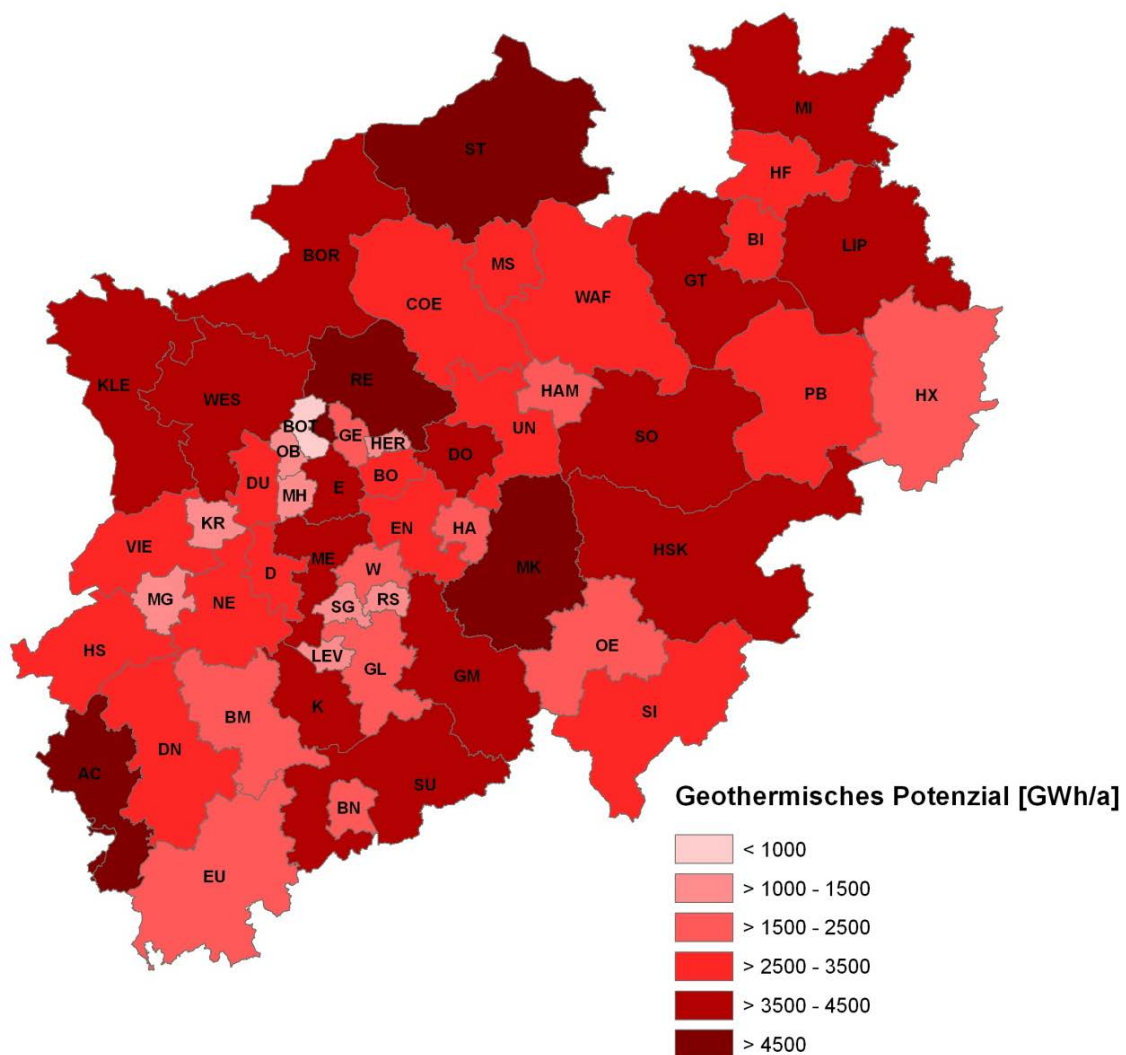


Abbildung 24: Technisch nutzbares geothermisches Potenzial für die Kreise (Szenario A)

Die Extremwerte auf Gemeindeebene gleichen sich dabei etwas aus, so dass ein Unterschied zwischen ländlichen und städtischen Regionen nicht mehr eindeutig identifizierbar ist. Vielmehr scheinen dabei die individuellen regionalen Gegebenheiten, die einen Einfluss auf den Wärmebedarf oder die geothermische Ergiebigkeit haben, den entscheidenden Aus-

schlag zu geben. Die Abhängigkeit des technischen Potenzials zu der Bevölkerungsanzahl ist jedoch auch hier erkennbar.

Betrachtet man nun den Deckungsanteil des geothermischen Potenzials im Vergleich zum Wärmebedarf für das Szenario A für die Kreise, so ergibt sich hier ein sehr heterogenes Bild (s. Abb. 25).

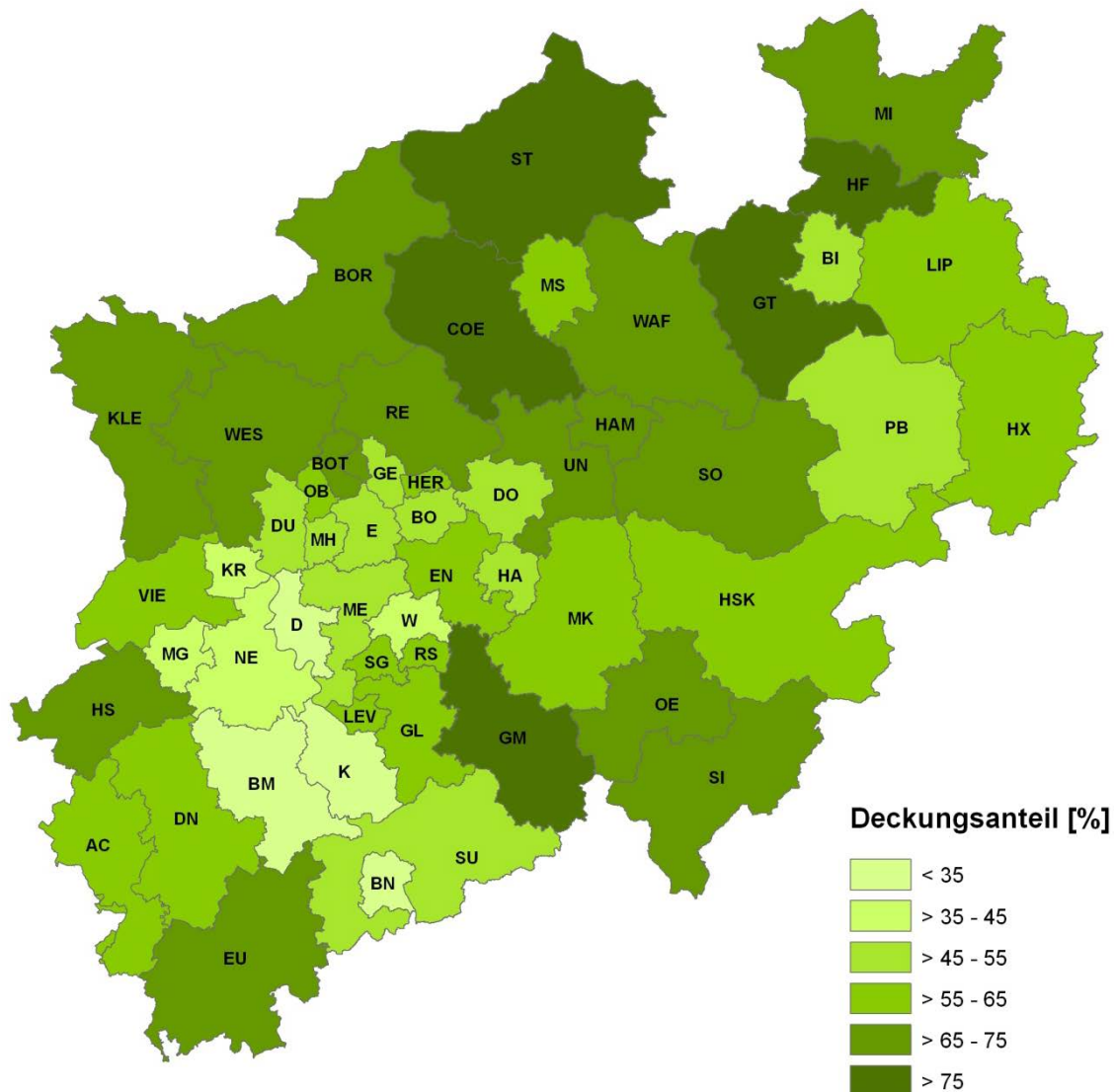


Abbildung 25: Prozentualer Deckungsanteil für die Kreise (Szenario A)

Das Aggregieren auf Kreisebene relativiert dabei die Extremwerte auf der Gemeindeebene. Dennoch zeigen sich weiterhin deutliche Unterschiede zwischen den Kreisen. Auch hier ergeben sich zwischen ländlich geprägten und dicht besiedelten Kreisen die Unterschiede in erster Linie durch die Dichte der Bebauung. Je dichter die Bebauung, desto schwieriger wird es auf der verbleibenden Grundstücksfläche eine entsprechend große Energiemenge zu generieren.

6.1.3. NRW

Die Aggregation aller relevanten Besitzstücke ergibt für ganz NRW sowie für die fünf Regierungsbezirke nachfolgendes Ergebnis (s. Tab. 12).

Tabelle 12: Gesamtbetrachtung der Regierungsbezirke und ganz NRW

	Arnsberg	Detmold	Düsseldorf	Köln	Münster	NRW
Besitzstücke Anzahl	712.126	494.172	918.933	949.783	561.146	3.636.160
Besitzstücke [km ²]	2.149	2.284	1.946	1.835	2.535	10.749
Wärmebedarf [TWh/a]	58.771	36.712	75.876	62.077	37.660	271.097
Geothermisches Potenzial [TWh/a] <i>Szenario A</i>	34.724	23.692	38.222	31.134	25.936	153.708
Deckungsanteil in % <i>Szenario A</i>	59,1	64,5	50,4	50,2	68,9	56,7
Geothermisches Potenzial [TWh/a] <i>Szenario B</i>	33.135	21.414	34.082	27.705	24.987	141.323
Deckungsanteil in % <i>Szenario B</i>	56,4	58,3	44,9	44,6	66,4	52,1

Unter den getroffenen Annahmen ergibt sich ein Wärmebedarf von **271,1 TWh/a** für alle Gebäude in NRW. Dabei zeichnet sich der Regierungsbezirk Düsseldorf durch die hohe Bebauungsdichte mit dem höchsten Wärmebedarf aus. Dem gegenüber steht ein technisch nutzbares geothermisches Potenzial von **153,7 TWh/a**. Somit ergibt sich für ganz NRW ein prozentualer Deckungsanteil von **56,7 %**. Dies bedeutet, dass über die Hälfte des Wärmebedarfs der Gebäude über die oberflächennahe Geothermie mittels Erdwärmesonden gedeckt werden kann.

Auf der Ebene der Regierungsbezirke zeichnet sich der Regierungsbezirk Münster mit dem höchsten Deckungsanteil von fast 70 % aus. Das technisch nutzbare geothermische Potenzial ist im Regierungsbezirk Düsseldorf mit fast 40 TWh/a am höchsten. Auch hier ist der Unterschied zwischen ländlich und städtisch geprägten Regionen erkennbar.

6.2. Szenarienbetrachtung

Um die verschiedenen Genehmigungspraktiken in NRW deutlicher abzubilden wurde in dieser Studie auch ein Szenario berechnet, in dem die Wasserschutz- sowie Heilquellenschutzgebiete III, IIIa, IIIb und IIIc komplett als Ausschussflächen definiert sind. Dies hat zur Folge, dass in den Gemeinden mit einem Flächenanteil an einer dieser Schutzzonen, das technisch nutzbare geothermische Potenzial und somit auch der Deckungsanteil deutlich sinkt.

Welchen Einfluss die verschärfte Restriktion für die Gemeinden hat lässt sich der nachfolgenden Abbildung (Abb. 26) entnehmen:

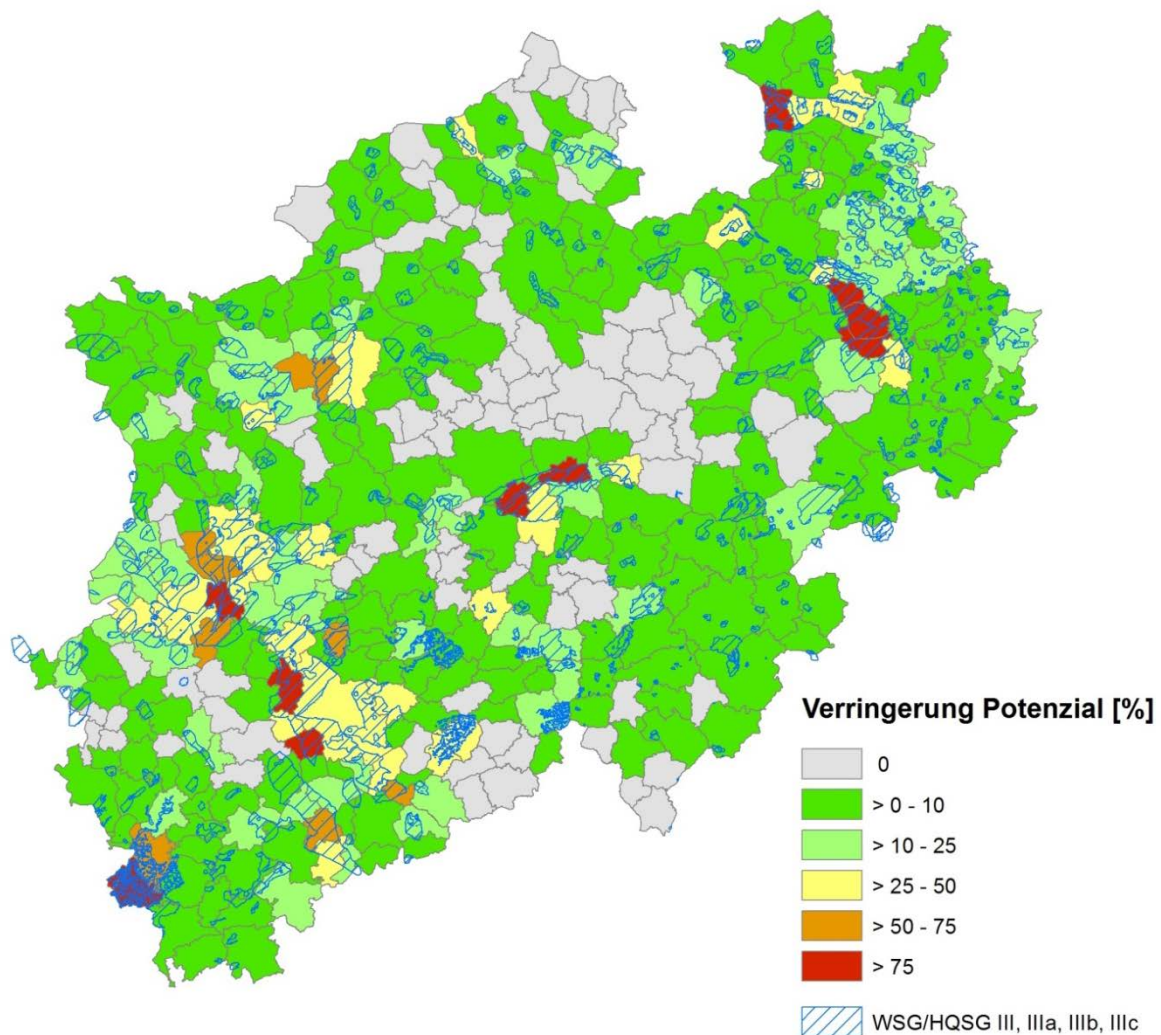


Abbildung 26: Verringerung des geothermischen Potenzials auf Gemeindeebene (Szenario B)

Während viele Gemeinden nicht betroffen sind, da Sie keinen Flächenanteil an einer der Schutzzonen haben, so verringert sich das technisch nutzbare geothermische Potenzial bei einigen Gemeinden um deutlich mehr als 75 %.

Bei einer Betrachtung der Reduktion des Potenzials auf Kreisebene ergibt sich für NRW das in Abbildung 27 dargestellte Bild. Wie schon bei den vorherigen Betrachtungen relativieren sich die Extremwerte bei einer weiteren Aggregation auf Kreisebene etwas. Die einzigen Kreise in NRW, die keinen Flächenanteil an einer der oben genannten Schutzzonen haben sind Hamm, Herne und Oberhausen. Bei diesen Kreisen reduziert sich das Potenzial dementsprechend nicht. Anders sieht dies bei mehreren Kreisen entlang des Rheins aus. Hier reduziert sich das geothermische Potenzial in einigen Kreisen und kreisfreien Städten um mehr als 20 %.

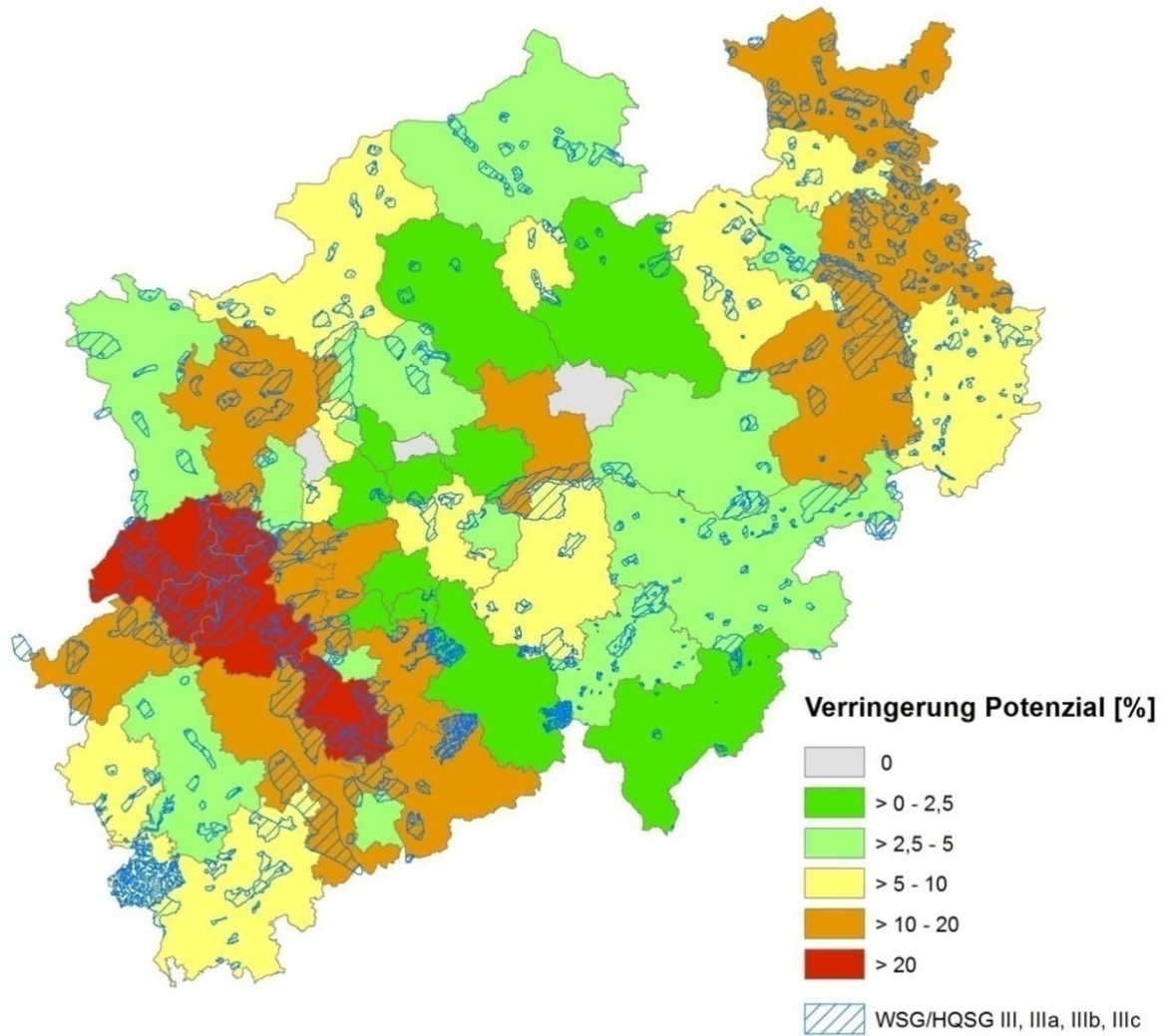


Abbildung 27: Verringerung des geothermischen Potenzials auf Kreisebene (Szenario B)

Für ganz NRW reduziert sich der prozentuale Deckungsanteil von **56,7 %** auf **52,1 %**. Das technisch nutzbare geothermische Potenzial sinkt von **153,7 TWh/a** auf **141,3 TWh/a**.

6.3. Potenzial für Neubauten

Das geothermische Potenzial für Neubauten wurde pro Jahr berechnet (vgl. 3.1.3). Dabei entspricht der zukünftige Gebäudebedarf auch dem geothermischen Potenzial, da davon auszugehen ist, dass eine hundertprozentige Wärmeversorgung des Gebäudes mittels Erdwärmesonden möglich ist. Die nachfolgende Grafik (Abb. 28) zeigt das geothermische Potenzial auf Gemeindeebene:

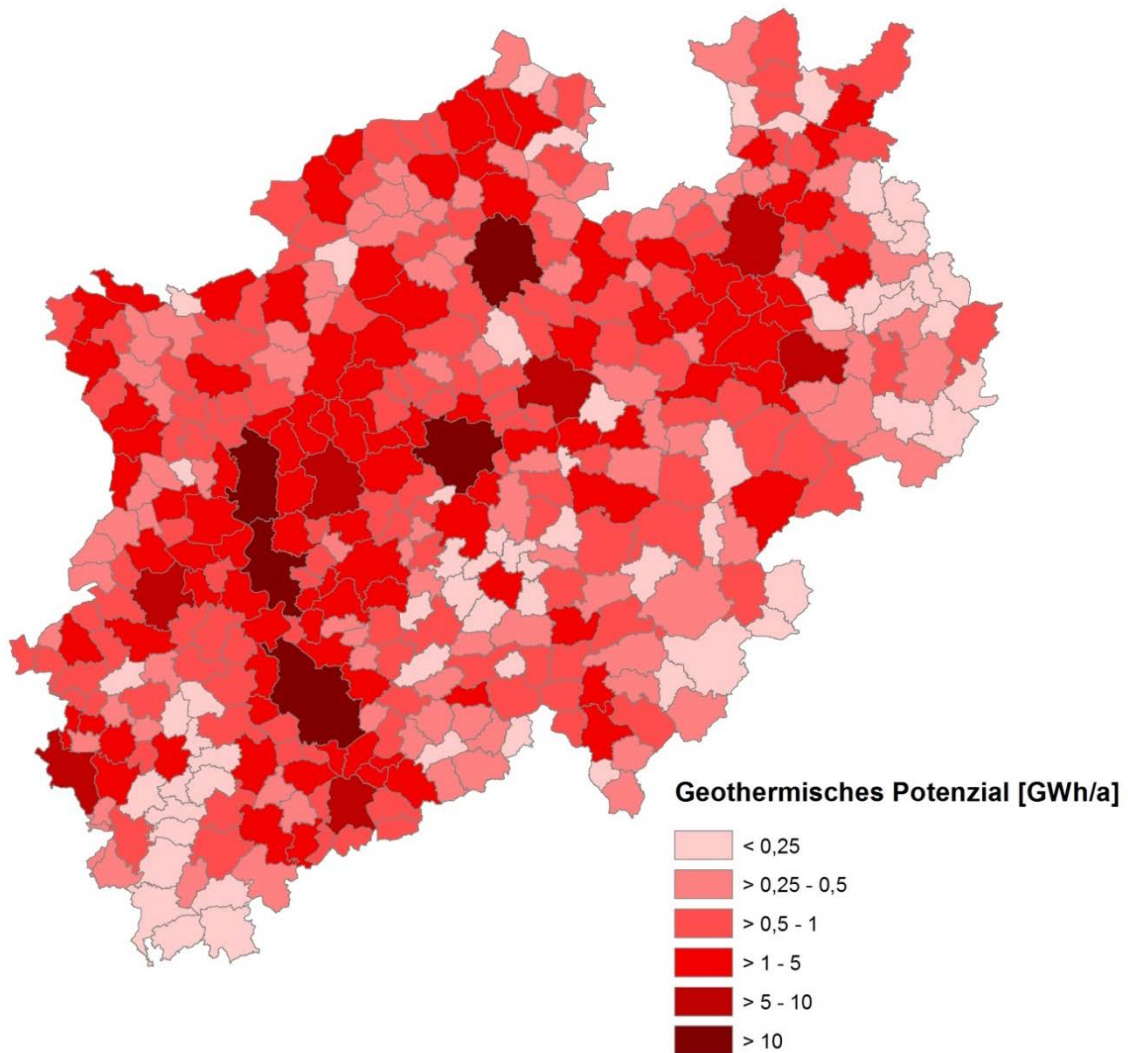


Abbildung 28: Potenzial der Neubauten auf Gemeindeebene

Die Gemeinden mit der höchsten Zubauquote sind demnach Köln mit einem geschätzten Wärmebedarf von 16,6 GWh/a und Dortmund mit einem Bedarf von 13,3 GWh/a.

Für ganz NRW ergibt sich somit ein zukünftiges technisch nutzbares geothermisches Potenzial von **426 GWh/a**. Bis zum Jahr 2025 könnte sich demnach ein zusätzliches geothermisches Potenzial von **6 TWh** ergeben.

7. Zusammenfassende Einschätzung der Ergebnisse

Die ermittelten Anteile des technisch nutzbaren geothermischen Potenzials auf Gemeinde-, Kreis, und Regierungsbezirksebene spiegeln die Wechselwirkungen der wesentlichen Einflussgrößen wie Bebauungsdichte, der Flächenanteil der Restriktionsflächen / Wasserschutzgebiete sowie die geothermischen Parameter wie Wärmeleitfähigkeit und Untergrundtemperatur wider.

Es ist zu beachten, dass in dieser Studie ein technisch nutzbares geothermisches Potenzial ausgewiesen ist. Welcher Anteil des Potenzials tatsächlich umsetzbar ist, lässt sich nicht in einem ausreichenden Umfang prognostizieren. Faktoren wie Akzeptanz, Wirtschaftlichkeit oder das Wärmeverteilsystem innerhalb eines Gebäudes stellen Hemmnisse dar und sorgen für ein geringeres machbares Potenzial als das technische Potenzial. Die Zulassung der einzelnen Sondenanlage und Festlegung der wasserwirtschaftlichen Anforderungen im Einzelfall (wasserrechtliche Nebenbestimmungen), unterliegen der zuständigen Wasserbehörde.

Die Ergebnisse sind zudem sehr stark abhängig von den im Rahmen der Potenzialstudie gewählten Randbedingungen und Berechnungsansätze. Dabei wurden für die notwendigen Vereinfachungen und Pauschalierungen überwiegend konservative Ansätze gewählt. Dazu zählen vor allem die maximale Sondentiefe von 100 m sowie der nicht berücksichtigte kombinierte Heiz- und Kühlbetrieb. Andererseits kann das technisch nutzbare geothermische Potenzial in einzelnen Gebieten auch geringer ausfallen, da u.a. punktförmige Restriktionen infolge von Altlasten und oberflächennahem (Alt-)Bergbau nicht berücksichtigt werden konnten. Es ist demnach davon auszugehen, dass das technisch nutzbare geothermische Potenzial für ganz NRW, und somit auch der Deckungsanteil, in der Summe größer ist, als der in dieser Studie ermittelte Wert.

Im Folgenden werden die wichtigsten Stellgrößen im Hinblick auf ihren Einfluss auf das geothermische Potenzial erläutert.

Max. Sondentiefe 100 m

Es wurde aufgrund der geologischen Datenlage und den aktuellen Genehmigungsstandards eine maximale Sondentiefe von 100 m gewählt. In der Realität sind grundsätzlich im Bereich von restriktionsfreien Besitzstücken Sondentiefen > 100 m möglich. Dies ist vor allem bei größer dimensionierten Anlagen, die einen hohen Wärmebedarf abdecken müssen, häufig. Eine gewählte Sondentiefe > 100 m könnte insbesondere in Gemeinden mit erhöhter Bebauungsdichte den geothermischen Deckungsanteil deutlich steigern.

Kombinierter Heiz- und Kühlbetrieb

Grundsätzlich ist der kombinierte Heiz- und Kühlbetrieb eine hervorragende Möglichkeit, die geothermische Ergiebigkeit einer Sondenfeldanlage zu erhöhen. Durch den kombinierten Betrieb und die daraus resultierende künstliche Regeneration in den Sommermonaten, ergibt sich zu Beginn der Heizperiode ein hohes Temperaturniveau im Erdreich und eine entspre-

chend hohe geothermische Ergiebigkeit. In diesem Fall sind ggf. von den o.g. Annahmen abweichende Randbedingungen (z.B. abweichende Abstandsregelungen zwischen Sonden) im Einzelfall erforderlich. Unter der Voraussetzung, dass die Kühllast, der Kühlbedarf und die Bedarfsverteilung des Gebäudes bekannt sind, lässt sich der Einfluss der künstlichen Regeneration simulieren. Im Gegensatz zur Heizlast ist die Kühllast allerdings nicht nahezu linear abhängig von der Außentemperatur. Die Abhängigkeiten sind komplexer und für jedes Gebäude individuell. Die Abhängigkeiten beziehen sich primär auf den Fensterflächenanteil, die geographische Ausrichtung und die Nutzung (interne Lasten) des Gebäudes. Eine pauschale Annahme für Bestandsgebäude ist daher nicht möglich.

Wird ein Gebäude geothermisch gekühlt, so kann durchaus eine Steigerung der geothermischen Ergiebigkeit in der Größenordnung von 10% bis 20% erreicht werden.

Wasserschutzgebiete

Zur Berücksichtigung der allgemein (auch außerhalb von Wasserschutzgebieten) zu stellenden wasserwirtschaftlichen Mindestanforderungen (vgl. LAWA, 2011, und Aktualisierung des LUA-Merkblattes 48) und möglicher Einzelfallentscheidungen der zuständigen Behörden aufgrund besonderer standörtlicher Voraussetzungen, wurde mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe abgestimmt, dass Besitzstücke, die innerhalb von Wasserschutzgebieten der Zonen III, IIIa, IIIb, IIIc liegen, pauschal mit einer Restriktion (40 m Sondentiefe und Wasser, Szenario A) belegt bzw. von der geothermischen Nutzung ausgeschlossen (Szenario B) werden. In der Genehmigungspraxis wird dieser pauschale Ansatz nicht verfolgt, da die Ausstellung einer Erlaubnis im Ermessen der zuständigen Unteren Wasserbehörde liegt. So sind derzeit Geothermieanlagen im Bereich der Wasserschutzgebiete III, IIIa, IIIb und IIIc mit Sondertiefen > 40 m und Glykol als Wärmeträgermedium vorhanden.

Punktförmige Restriktionen

Punktuelle Restriktionen die aufgrund von oberflächennahem Altbergbau, infolge von Altlasten oder sensiblen Bereichen bzgl. der Nutzung des Grundwassers ohne der Ausweisung eines Schutzgebiets vorhanden sind, konnten nicht berücksichtigt werden. Diese Restriktionen führen dazu, dass in Einzelfällen die Errichtung einer Erdwärmesonde nicht genehmigt werden kann. Flächendeckend kann dies vor allem im Ruhrgebiet bzgl. des (Alt-)Bergbaus eine Auswirkung auf das technisch nutzbare geothermische Potenzial haben. Daher ist davon auszugehen, dass in Gemeinden und Kreisen im Ruhrgebiet das Potenzial geringer ausfällt, als der in dieser Studie ermittelte Wert.

8. Literatur

- ARGE (2011) Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.: Wohnungsbau in Deutschland – 2011, Modernisierung oder Bestandsersatz.
- ASUE (2010) Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Blockheizkraftwerke in Krankenhäusern Kostensenkung durch effiziente Strom- und Wärmeerzeugung, Berlin 2010.
- AwSV (2013): Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Entwurf vom 22.Juli 2013.
- BAFA (2013) Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Förderbedingung für effiziente Wärmepumpen.
- Bracke, R. et al. (2008): Analyse der Wertschöpfungskette Geothermie in der Metropole Ruhr; Geothermiezentrum Bochum (Herausgeber), Hochschule Bochum - Bochum University of Applied Sciences
- DIN EN 12831 (2003): Heizungsanlagen in Gebäuden, Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast. Beuth Verlag Berlin.
- Eicker, T. (2010): Auslegung großer oberflächennaher Geothermieanlagen - Planungsgrundlagen und Annahmen auf dem Prüfstand -, GZB International Geothermal Centre, Bochum
- Graf, H. et al. (2013): Praxis und Materialwahl beim Einbau von Erdwärmesonden, BBR 2013 Fachmagazin für Leitungsbau, Brunnenbau und Geothermie Ausgabe 07/08 2013 Artikel S.76ff.
- Grimm, R. (2014): Stand der oberflächennahen Geothermie in Deutschland, BBR 2014 Fachmagazin für Leitungsbau, Brunnenbau und Geothermie, Sonderheft Geothermie Artikel S.12ff.
- IT.NRW (2012): Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher (einschließlich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher); www.it.nrw.de/statistik (abgerufen Juni 2013)
- IT.NRW (2011): Bevölkerung nach Nationalität und Geschlecht – Zensus 2011; <https://www.landesdatenbank.nrw.de> (abgerufen Mai 2014)
- IWU (2011) Institut Wohnen und Umwelt GmbH: Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Darmstadt 2011.
- IWU (2012) Institut Wohnen und Umwelt GmbH: Nichtwohngebäude im Bestand Strategien für Energieeffizienz und Klimaschutz, Darmstadt 2012.
- Kaltschmitt, M. et. al (1999): Kaltschmitt, M., Huenges, E., Wolff, H., Baumgärtner, J., Hoth, P., Kayser, M., Sanner, B., Schallenberg, K., Jung, R., Scheytt, T., Lux, R. Energie aus Erdwärme, Spektrum Akademischer Verlag; 1999.
- Kz (2004) Kennziffernkatalog: Investitionsbereich in der Energiewirtschaft Ausgabe 2004, ENERGY CONSULTING (GfEM) Gesellschaft für Energiemanagement, Neuhagen / Berlin.
- LANUV (2013): Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Klimaatlas NRW (<http://www.klimaatlas.nrw.de/site/nav2/KarteMG.aspx>), Datenquelle: Deutscher Wetterdienst
- LUA Merkblätter Band 48 (2004): Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme, Landesumweltamt NRW, Essen 2004.
- Nikolaus Dr. et al. (2010): Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Bremer Energie Institut (BEI); Datenbasis Gebäudebestand Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand, Darmstadt 2010
- SIA 384/6 (1996) Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA): Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme. SIA-Dokumentation D 0136

- Signorelli & Kohl (2002): Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW) Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge ausgearbeitet durch Sarah Signorelli Institut für Geophysik ETH Höggerberg, 8093 Zürich und PD Dr. Thomas Kohl Institut für Geophysik ETH Höggerberg, 8093 Zürich im Auftrag des Bundesamtes für Energie November 2002 Schlussbericht
- Tippkötter R. et al. (2009): Leitfaden Energieeffizienz für Krankenhäuser, EnergieAgentur.NRW, Düsseldorf
- VDI 2067 (1993): Blatt 2 – Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen, Raumheizung.
- VDI 4640 (2010): Richtlinie Blatt 1, Thermische Nutzung des Untergrundes, Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte.
- VDI 4640 (2001): Richtlinie Blatt 2, Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlage

Anhang 1: Sondenfeldkonfigurationen

Zuordnung Sondenfeldkonfiguration [m ²]			
Klasse	von	bis	Anzahl Sonden
00	< 100		0
01	100	159	1
02	160	219	2
03	220	255	3
04	256	351	4
05	352	447	6
06	448	483	9
07	484	615	12
08	616	783	16
09	784	951	20
10	952	1155	25
11	1156	1359	36
12	1360	1599	49
13	1600	1971	64
14	1972	2115	81
15	2116	2391	100
16	2392	2703	121
17	2704	3015	144
18	3016	3363	169
19	3364	3711	196
20	3712	4095	225
21	4096	4899	256
22	4900	5775	289
23	5776	6723	324
24	6724	7743	361
25	7744	8835	400
26	8836	9999	441
27	10000	11235	484
28	11236	12543	529
29	12544	13923	576
30	13924	15375	625
31	15376	23715	676
32	23716	33855	729
33	33856	43263	784
34	43264	59535	841
35	59536	92415	900
36	92416	179775	961
37	179776	364815	1024
38	364816	2262015	1089
39	>2262016		1156

Anhang 2: Aggregierte Daten auf Gemeindeebene

Name	Besitzstücke	Fläche [km ²]	Gebäudebedarf [GWh/a]	Technisches Potenzial [GWh/a]			Deckungsanteil	
				Szenario A	Szenario B	Neubauten	Szenario A	Szenario B
Aachen Stadt	37645	59,8	3.531,3	1.759,1	1.726,1	6,0	49,8%	48,9%
Ahaus	10386	53,7	625,0	460,5	430,7	2,8	73,7%	68,9%
Ahlen	11345	47,4	800,4	544,9	544,9	1,4	68,1%	68,1%
Aldenhoven	3559	7,7	212,0	149,5	149,2	0,3	70,5%	70,4%
Alfter	6584	8,4	302,6	124,0	115,1	0,7	41,0%	38,0%
Alpen	3759	24	191,4	152,4	141,5	0,7	79,6%	73,9%
Alsdorf	11124	9,2	552,3	407,3	407,3	1,3	73,8%	73,8%
Altena	4747	15,3	439,3	231,2	224,1	0,2	52,6%	51,0%
Altenbeken	2657	11,6	149,8	77,3	41,8	0,3	51,6%	27,9%
Altenberge	2686	27,5	166,6	137,4	137,4	0,7	82,5%	82,5%
Anröchte	3095	14,5	240,8	173,6	173,6	0,4	72,1%	72,1%
Arnsberg	17510	66,5	1.426,2	849,7	838,1	1,8	59,6%	58,8%
Ascheberg	3454	36,7	209,9	184,7	184,7	0,2	88,0%	88,0%
Attendorn	5723	18	460,2	243,8	232,7	1,3	53,0%	50,6%
Augustdorf	2103	33,4	190,1	53,7	1,4	0,1	28,2%	0,7%
Bad Berleburg	5853	78	387,6	286,6	284,3	0,2	73,9%	73,3%
Bad Driburg	4982	22,7	391,0	230,1	222,9	0,5	58,9%	57,0%
Bad Honnef	6725	12,1	371,0	229,3	218,9	0,6	61,8%	59,0%
Bad Laasphe	4395	39,5	267,2	196,8	196,7	0,3	73,7%	73,6%
Bad Lippspringe	3360	29,6	243,6	68,0	0,7	0,4	27,9%	0,3%
Bad Münstereifel	6247	29,6	309,1	237,8	204,0	0,4	76,9%	66,0%
Bad Oeynhausen	12420	24,1	838,9	538,7	493,5	1,0	64,2%	58,8%
Bad Salzuflen	13663	43	1.053,4	614,1	549,3	1,2	58,3%	52,1%
Bad Sassendorf	2962	14,2	208,5	157,4	157,4	0,4	75,5%	75,5%
Bad Wünnenberg	3380	32,1	278,7	179,8	172,1	0,7	64,5%	61,7%
Baesweiler	6327	4,5	330,8	247,1	247,1	0,5	74,7%	74,7%
Balve	3426	15,8	243,5	185,5	185,1	0,2	76,2%	76,0%
Barntrup	2638	12,4	218,7	133,9	112,7	0,1	61,2%	51,5%
Beckum	9051	39,8	651,6	448,0	448,0	0,7	68,8%	68,8%
Bedburg	6970	11,3	294,2	185,6	185,6	0,7	63,1%	63,1%
Bedburg-Hau	3936	28,9	224,0	177,7	174,1	0,5	79,3%	77,7%
Beelen	1564	11,8	131,8	92,8	88,3	0,3	70,4%	67,0%
Bergheim	14579	21,8	802,5	262,9	249,0	0,7	32,8%	31,0%
Bergisch Gladb.	23881	34,8	1.541,0	742,5	545,4	2,4	48,2%	35,4%
Bergkamen	9815	13,9	523,2	437,8	437,8	0,8	83,7%	83,7%

Bergneustadt	4458	9,7	299,7	227,7	226,7	0,2	76,0%	75,6%
Bestwig	3039	15,1	204,6	136,7	123,6	0,2	66,8%	60,4%
Beverungen	4469	28,6	311,4	181,0	166,2	0,2	58,1%	53,4%
Bielefeld	55175	144,1	5.308,2	2.796,6	2.673,4	6,6	52,7%	50,4%
Billerbeck	3319	33,6	234,2	187,3	186,1	0,6	80,0%	79,4%
Blankenheim	3393	16,4	169,4	126,8	119,3	0,2	74,8%	70,4%
Blomberg	5190	28,5	395,8	237,7	211,6	0,4	60,1%	53,5%
Bocholt	17935	51,5	1.061,7	656,1	598,9	2,6	61,8%	56,4%
Bochum	50996	79,9	5.314,7	2.853,9	2.806,3	4,6	53,7%	52,8%
Bönen	4463	12,9	267,8	189,3	189,3	0,6	70,7%	70,7%
Bonn	56266	57,5	4.555,2	1.551,9	1.494,7	8,3	34,1%	32,8%
Borchen	3446	10,3	223,1	156,8	156,8	0,3	70,3%	70,3%
Borgentreich	3274	33,3	234,1	170,0	169,9	0,2	72,6%	72,6%
Borgholzhausen	2242	19,1	169,3	140,4	138,3	0,5	82,9%	81,7%
Borken	10314	61,7	660,1	494,8	478,2	2,9	74,9%	72,4%
Bornheim	12797	17	673,2	367,6	303,4	1,5	54,6%	45,1%
Bottrop	19886	34	1.409,9	918,3	851,4	1,5	65,1%	60,4%
Brakel	4955	63,9	358,2	235,8	229,8	0,3	65,8%	64,2%
Breckerfeld	2597	15	180,1	125,8	120,7	0,2	69,9%	67,0%
Brilon	7572	63,6	667,0	347,1	306,1	1,0	52,0%	45,9%
Brüggen	4861	18,5	273,6	169,8	128,5	0,5	62,1%	47,0%
Brühl	9545	13,8	595,0	266,3	266,2	0,9	44,7%	44,7%
Bünde	11764	20,9	728,1	578,9	532,1	1,7	79,5%	73,1%
Burbach	4330	21,3	266,1	218,9	218,9	0,4	82,3%	82,3%
Büren	6157	45,5	479,6	299,3	299,3	0,7	62,4%	62,4%
Burscheid	4338	7,8	262,9	187,3	180,9	0,3	71,2%	68,8%
Castrop-Rauxel	14950	18,8	871,5	627,8	627,8	1,2	72,0%	72,0%
Coesfeld	9174	46	591,5	399,1	359,7	1,9	67,5%	60,8%
Dahlem	1833	18	81,9	70,6	70,4	0,1	86,2%	86,0%
Datteln	7068	15,9	427,6	315,5	315,5	0,7	73,8%	73,8%
Delbrück	7617	59	581,7	447,9	423,5	1,5	77,0%	72,8%
Detmold	18628	69,5	1.351,0	784,7	670,9	1,4	58,1%	49,7%
Dinslaken	13060	17,2	851,4	557,4	557,4	1,7	65,5%	65,5%
Dörentrup	2445	12,7	179,1	140,8	136,6	0,1	78,6%	76,3%
Dormagen	13094	22,2	903,8	482,5	351,4	2,0	53,4%	38,9%
Dorsten	16348	50,2	951,1	523,3	345,2	2,0	55,0%	36,3%
Dortmund	79551	117,2	8.089,0	3.671,7	3.602,4	13,3	45,4%	44,5%
Drensteinfurt	4282	36,6	218,6	187,5	187,0	0,9	85,8%	85,6%
Drolshagen	3169	9	210,6	157,3	138,7	0,5	74,7%	65,9%

Duisburg	67752	113,5	6.107,5	3.192,0	3.062,2	10,5	52,3%	50,1%
Dülmen	11588	74,3	707,8	546,3	539,9	1,5	77,2%	76,3%
Düren	19951	30,7	1.577,4	684,3	651,1	2,0	43,4%	41,3%
Düsseldorf	60842	129,3	9.418,7	2.765,0	2.353,0	12,6	29,4%	25,0%
Eitorf	5910	11,7	303,3	229,3	229,3	0,5	75,6%	75,6%
Elsdorf	6117	6,8	272,6	196,6	196,6	0,2	72,1%	72,1%
Emmerich a. R.	8902	22,4	594,3	379,4	355,3	1,4	63,8%	59,8%
Emsdetten	9249	21,5	535,6	358,7	312,9	1,6	67,0%	58,4%
Engelskirchen	5895	14,3	334,6	249,6	249,6	0,3	74,6%	74,6%
Enger	5287	17,2	324,6	271,4	262,6	0,5	83,6%	80,9%
Ennepetal	6735	25,3	716,7	413,6	413,6	0,7	57,7%	57,7%
Ennigerloh	5185	41,1	374,1	267,7	267,7	0,7	71,5%	71,5%
Ense	3342	11,2	210,1	131,1	80,0	0,6	62,4%	38,1%
Erftstadt	14883	27	601,8	44,5	44,0	1,1	7,4%	7,3%
Erkelenz	13128	17,6	725,2	446,3	354,9	2,1	61,5%	48,9%
Erkrath	6921	10,7	543,5	226,9	186,6	0,5	41,8%	34,3%
Erndtebrück	2131	10,9	156,6	117,2	117,2	0,2	74,8%	74,8%
Erwitte	4444	18,9	342,3	234,1	226,1	0,7	68,4%	66,1%
Eschweiler	13078	20,7	893,1	523,0	515,5	1,5	58,6%	57,7%
Eslohe (Sauerl.)	2492	15,3	205,4	156,5	154,8	0,2	76,2%	75,4%
Espelkamp	5299	27,5	392,1	348,0	338,9	0,8	88,8%	86,4%
Essen	77554	106,6	7.917,7	4.248,1	4.196,7	10,0	53,7%	53,0%
Euskirchen	14361	24,6	803,6	550,6	531,2	1,7	68,5%	66,1%
Everswinkel	2518	25,9	160,4	126,4	125,4	0,4	78,8%	78,2%
Extertal	3919	37,5	320,4	226,2	182,6	0,1	70,6%	57,0%
Finnentrop	4589	21,9	316,7	190,9	166,7	0,4	60,3%	52,6%
Frechen	11115	16,9	675,1	146,1	85,6	2,0	21,6%	12,7%
Freudenberg	5507	9,2	296,6	234,5	234,5	0,9	79,1%	79,1%
Fröndenberg/Ruhr	5548	13,2	298,6	150,4	26,7	0,4	50,4%	8,9%
Gangelt	3797	6,4	171,2	142,8	128,2	0,5	83,4%	74,9%
Geilenkirchen	7669	18,4	429,6	304,0	295,0	0,7	70,8%	68,7%
Geldern	9662	32	871,4	561,3	550,8	2,0	64,4%	63,2%
Gelsenkirchen	31083	61,9	3.536,0	1.775,3	1.769,5	3,2	50,2%	50,0%
Gescher	4142	33,3	240,0	207,7	207,7	0,2	86,6%	86,6%
Geseke	5428	17,7	397,1	250,4	250,4	0,6	63,0%	63,0%
Gevelsberg	6035	12,3	569,9	333,4	333,4	0,4	58,5%	58,5%
Gladbeck	12803	14,9	850,5	573,3	560,5	1,1	67,4%	65,9%
Goch	9864	41,9	594,6	440,9	437,6	1,3	74,1%	73,6%
Grefrath	4543	9,5	270,3	182,6	182,6	0,3	67,5%	67,5%

Greven	8405	45,7	534,2	381,7	371,5	1,7	71,5%	69,5%
Grevenbroich	15631	24,1	1.270,5	396,8	366,4	0,7	31,2%	28,8%
Gronau (Westf.)	13019	29,1	660,8	474,1	429,5	2,6	71,7%	65,0%
Gummersbach	12788	26,1	854,0	617,5	616,0	0,7	72,3%	72,1%
Gütersloh	20709	62,9	1.536,0	1.071,5	1.044,6	3,6	69,8%	68,0%
Haan	7170	10	487,9	294,4	289,4	1,1	60,3%	59,3%
Hagen	27031	55,8	3.188,9	1.527,8	1.485,9	3,1	47,9%	46,6%
Halle (Westf.)	5301	26,9	354,9	191,6	132,0	0,7	54,0%	37,2%
Hallenberg	1458	15,4	121,2	81,0	81,0	0,1	66,8%	66,8%
Haltern am See	9190	32,2	438,6	323,5	292,2	1,1	73,8%	66,6%
Halver	3814	12,5	332,9	159,1	111,5	0,1	47,8%	33,5%
Hamm	35650	71,7	2.383,2	1.631,5	1.631,5	6,0	68,5%	68,5%
Hamminkeln	7392	58,3	447,6	326,7	275,5	0,9	73,0%	61,6%
Harsewinkel	6170	31,7	388,4	293,2	275,5	1,1	75,5%	70,9%
Hattingen	9678	39,5	862,6	572,6	544,7	0,9	66,4%	63,1%
Havixbeck	3166	23,4	173,1	140,7	140,7	0,4	81,3%	81,3%
Heek	2335	22	127,7	115,6	113,5	0,9	90,5%	88,8%
Heiden	1928	17,7	113,4	99,3	87,4	0,3	87,5%	77,1%
Heiligenhaus	4998	13,5	391,3	246,3	224,7	0,6	63,0%	57,4%
Heimbach	1775	19,7	81,5	68,5	68,1	0,1	84,1%	83,5%
Heinsberg	12487	19,7	684,1	518,5	516,4	1,2	75,8%	75,5%
Hellenthal	3338	22,5	158,9	141,7	140,9	0,2	89,2%	88,7%
Hemer	7713	24,6	629,1	385,9	372,6	0,6	61,3%	59,2%
Hennef (Sieg)	12829	22,5	687,1	407,7	349,4	1,5	59,3%	50,9%
Herdecke	4784	13,1	396,9	278,2	278,2	0,2	70,1%	70,1%
Herford	13973	34,2	1.081,3	798,9	753,5	1,9	73,9%	69,7%
Herne	20464	23,8	1.970,1	1.128,6	1.128,6	1,1	57,3%	57,3%
Herscheid	2161	12,2	147,0	113,8	113,8	0,1	77,4%	77,4%
Herten	11667	13,4	721,1	517,0	517,0	1,1	71,7%	71,7%
Herzebrock-Clarh.	4080	31,1	292,2	221,8	182,6	0,7	75,9%	62,5%
Herzogenrath	11738	11,1	585,0	408,4	408,4	1,1	69,8%	69,8%
Hiddenhausen	5605	9,4	317,4	204,6	129,0	0,5	64,5%	40,6%
Hilchenbach	4424	12,7	255,9	187,6	184,8	0,3	73,3%	72,2%
Hilden	8960	11	858,4	412,4	381,5	1,0	48,0%	44,4%
Hille	4619	22,9	296,2	247,4	161,3	0,2	83,5%	54,5%
Holzwickede	3852	6,1	223,1	165,3	153,8	0,6	74,1%	68,9%
Hopsten	2125	26,1	121,9	118,3	118,3	0,3	97,0%	97,0%
Horn-Bad Meinb.	4932	21	396,5	239,0	218,3	0,2	60,3%	55,1%
Hörstel	5489	32,4	315,0	266,7	266,7	1,4	84,7%	84,7%

Horstmar	1810	11,8	97,2	82,0	82,0	0,3	84,4%	84,4%
Hövelhof	3801	21,9	320,6	216,0	215,8	1,0	67,4%	67,3%
Höxter	8765	59,2	577,4	345,1	294,9	0,6	59,8%	51,1%
Hückelhoven	10570	13,7	549,4	427,5	427,5	0,9	77,8%	77,8%
Hückeswagen	3762	17,5	229,0	171,0	162,0	0,2	74,7%	70,7%
Hüllhorst	3628	14,3	244,5	224,8	224,6	0,1	91,9%	91,8%
Hünxe	3901	38,7	237,1	164,6	134,4	0,7	69,4%	56,7%
Hürtgenwald	3037	27,5	137,7	121,5	104,6	0,2	88,3%	76,0%
Hürth	12371	22,1	784,2	129,9	27,6	0,5	16,6%	3,5%
Ibbenbüren	13555	49	805,8	650,9	639,1	2,1	80,8%	79,3%
Inden	2031	6,9	125,8	101,7	101,7	0,4	80,8%	80,8%
Iserlohn	17680	52,9	1.599,8	738,9	520,6	0,5	46,2%	32,5%
Isselburg	3178	13,1	197,0	136,4	135,9	0,2	69,2%	69,0%
Issum	3607	16	192,3	143,9	139,2	0,6	74,8%	72,4%
Jüchen	6653	8	302,3	77,8	23,5	0,8	25,7%	7,8%
Jülich	8644	29,7	671,6	401,8	396,7	1,0	59,8%	59,1%
Kaarst	10211	11	486,8	276,8	200,7	0,8	56,9%	41,2%
Kalkar	4213	26,4	260,2	178,5	176,9	0,3	68,6%	68,0%
Kall	3861	10,9	230,7	161,3	157,2	0,3	69,9%	68,1%
Kalletal	4444	26,1	346,4	254,5	218,8	0,1	73,5%	63,2%
Kamen	9604	12,2	538,1	370,2	370,2	0,8	68,8%	68,8%
Kamp-Lintfort	8030	19,3	499,2	364,6	364,6	0,6	73,0%	73,0%
Kempen	9032	23,3	593,0	402,9	373,6	1,2	67,9%	63,0%
Kerken	3916	9,7	195,3	153,7	151,7	0,5	78,7%	77,7%
Kerpen	15460	24,7	856,4	154,6	154,6	0,6	18,0%	18,0%
Kevelaer	8167	37,5	538,3	344,5	301,0	1,5	64,0%	55,9%
Kierspe	4110	13,9	288,4	155,4	118,7	0,1	53,9%	41,2%
Kirchhundem	3583	18,1	214,9	179,7	176,9	0,3	83,6%	82,3%
Kirchlengern	4693	13,1	262,9	236,2	232,8	0,6	89,9%	88,6%
Kleve	13139	37,7	796,8	525,6	511,4	1,2	66,0%	64,2%
Köln	121316	181,7	12.820,7	3.816,9	2.674,0	16,6	29,8%	20,9%
Königswinter	11734	21,3	644,4	345,0	283,0	0,6	53,5%	43,9%
Korschenbroich	9307	11,7	450,7	213,5	47,3	1,0	47,4%	10,5%
Kranenburg	3338	25,1	170,3	134,6	127,4	0,7	79,1%	74,9%
Krefeld	42462	54	3.782,4	1.487,5	1.090,6	2,9	39,3%	28,8%
Kreuzau	5781	11,7	294,9	173,4	172,8	0,2	58,8%	58,6%
Kreuztal	8190	22,5	543,5	361,6	361,6	1,1	66,5%	66,5%
Kürten	5518	15,8	264,6	216,9	206,8	0,7	82,0%	78,2%
Ladbergen	1714	20,5	97,2	89,3	89,3	0,4	91,9%	91,9%

Laer	1803	12,3	91,7	80,3	80,3	0,4	87,6%	87,6%
Lage	9032	29,1	630,8	397,1	322,4	0,7	63,0%	51,1%
Langenberg	2197	17,2	141,6	121,7	121,7	0,3	86,0%	86,0%
Langenfeld (Rhld.)	13459	14,4	902,0	347,2	140,6	1,6	38,5%	15,6%
Langerwehe	4427	13	194,3	121,3	113,4	0,6	62,4%	58,3%
Legden	1819	23,9	106,4	94,7	93,1	0,4	89,0%	87,5%
Leichlingen (Rhld.)	6692	13,9	342,1	247,7	226,8	0,5	72,4%	66,3%
Lemgo	10818	37,5	783,5	472,8	409,3	1,0	60,3%	52,2%
Lengerich	5428	39,9	375,9	236,0	180,5	0,7	62,8%	48,0%
Lennestadt	6633	16,8	467,6	334,7	333,6	0,8	71,6%	71,4%
Leopoldshöhe	4362	18,5	314,1	214,5	202,2	0,5	68,3%	64,4%
Leverkusen	24411	34,1	2.124,5	1.231,2	1.184,0	2,7	58,0%	55,7%
Lichtenau	3278	35	221,7	154,3	149,1	0,5	69,6%	67,2%
Lienen	2347	30,5	132,6	124,2	123,5	0,3	93,7%	93,2%
Lindlar	6007	24,5	340,9	274,7	274,6	0,2	80,6%	80,6%
Linnich	4158	10,1	253,6	171,1	170,2	0,2	67,5%	67,1%
Lippetal	3361	35,6	221,1	211,2	211,2	0,5	95,5%	95,5%
Lippstadt	15282	33,3	1.040,9	727,9	706,9	2,1	69,9%	67,9%
Lohmar	9634	17,2	416,6	327,7	327,7	1,0	78,7%	78,7%
Löhne	10598	27,2	672,5	493,0	491,6	0,6	73,3%	73,1%
Lotte	3312	11,9	180,6	157,4	157,4	0,3	87,2%	87,2%
Lübbecke	6831	16,3	484,4	307,6	219,9	0,6	63,5%	45,4%
Lüdenscheid	13007	26,4	1.415,9	873,8	870,3	1,3	61,7%	61,5%
Lüdinghausen	5887	61,4	366,7	302,7	302,1	0,6	82,6%	82,4%
Lügde	3454	29,8	253,0	167,9	161,6	0,1	66,4%	63,9%
Lünen	13941	19,9	1.025,6	742,1	742,1	2,0	72,4%	72,4%
Marienheide	3743	14,7	212,5	177,4	177,0	0,3	83,5%	83,3%
Marienmünster	1850	14,1	125,4	86,9	78,6	0,1	69,3%	62,7%
Marl	15946	27,6	1.159,0	756,4	756,3	1,2	65,3%	65,3%
Marsberg	6217	48,9	462,8	276,4	265,8	0,7	59,7%	57,4%
Mechernich	8554	26,4	414,0	303,3	274,4	0,9	73,3%	66,3%
Meckenheim	8303	6,5	355,6	165,3	143,6	0,9	46,5%	40,4%
Medebach	2607	25,3	183,4	129,0	129,0	0,2	70,3%	70,3%
Meerbusch	12545	14,9	702,0	383,4	221,7	1,1	54,6%	31,6%
Meinerzhagen	5079	16,5	465,1	244,6	198,1	0,3	52,6%	42,6%
Menden (Sauerl.)	12819	43	951,6	631,8	563,8	1,0	66,4%	59,2%
Merzenich	2931	9,8	152,2	80,7	63,7	0,2	53,0%	41,8%
Meschede	7990	45,2	689,5	397,4	368,0	0,7	57,6%	53,4%
Metelen	1807	11,8	90,7	82,2	82,2	0,3	90,6%	90,6%

Mettingen	3138	16,8	197,5	162,1	162,1	0,4	82,1%	82,1%
Mettmann	7437	20,1	541,1	281,0	281,0	0,6	51,9%	51,9%
Minden	19128	32,7	1.301,1	843,8	714,2	2,1	64,9%	54,9%
Moers	20454	26,1	1.250,9	829,3	730,5	1,0	66,3%	58,4%
Möhnesee	3515	27,5	206,1	164,4	164,4	0,3	79,8%	79,8%
Mönchengladbach	51547	54,2	3.454,8	1.445,0	965,5	6,4	41,8%	27,9%
Monheim a. R.	7985	7,2	470,0	319,4	314,2	0,8	68,0%	66,9%
Monschau	4564	10,9	274,9	117,9	2,1	0,3	42,9%	0,8%
Morsbach	3590	14,2	213,2	172,5	172,5	0,2	80,9%	80,9%
Much	4728	9,6	254,1	122,5	74,1	0,4	48,2%	29,2%
Mülheim a. d. R.	27179	41,4	2.593,7	1.312,5	1.218,3	3,7	50,6%	47,0%
Münster	54924	146,4	4.657,6	2.564,8	2.429,3	12,0	55,1%	52,2%
Nachrodt-Wibl.	1611	8,9	114,6	78,5	78,5	0,2	68,5%	68,5%
Netphen	6583	14,4	403,4	276,7	268,6	0,5	68,6%	66,6%
Nettersheim	2746	12,4	135,5	112,4	107,8	0,2	83,0%	79,6%
Nettetal	11177	24,2	727,7	439,4	359,1	0,5	60,4%	49,4%
Neuenkirchen	3832	13,7	196,0	131,9	89,4	0,5	67,3%	45,6%
Neuenrade	3178	11,2	230,6	173,3	173,3	0,3	75,2%	75,2%
Neukirchen-Vluyn	6381	15,5	328,3	267,8	262,6	0,3	81,6%	80,0%
Neunkirchen	3850	14,4	262,0	171,4	171,4	0,1	65,4%	65,4%
Neunkirchen-Seel.	6530	5,4	298,0	129,6	92,5	0,4	43,5%	31,0%
Neuss	27773	31,7	2.578,1	1.111,4	994,3	3,8	43,1%	38,6%
Nideggen	3710	25,5	169,1	140,9	132,3	0,2	83,3%	78,2%
Niederkassel	10004	8,5	382,2	251,0	215,1	1,2	65,7%	56,3%
Niederkrüchten	4986	19,4	268,3	164,9	137,6	0,4	61,5%	51,3%
Niederzier	4298	18,2	249,4	151,6	127,1	0,2	60,8%	51,0%
Nieheim	2243	17,6	144,4	101,6	93,5	0,3	70,4%	64,7%
Nordkirchen	2663	20,2	172,2	132,2	132,2	0,3	76,8%	76,8%
Nordwalde	2473	26,6	154,8	128,3	126,8	0,4	82,9%	81,9%
Nörvenich	3176	12,6	144,7	109,7	109,7	0,2	75,8%	75,8%
Nottuln	5222	26,8	283,5	234,9	230,3	0,4	82,9%	81,3%
Nümbrecht	5225	14,5	256,2	232,4	232,4	0,4	90,7%	90,7%
Oberhausen	32329	40,8	2.320,3	1.456,4	1.456,4	2,6	62,8%	62,8%
Ochtrup	5210	33,3	282,9	233,6	233,6	0,8	82,6%	82,6%
Odenthal	4480	12,1	179,9	154,9	150,7	0,3	86,1%	83,7%
Oelde	7177	45,2	542,2	375,7	375,7	1,0	69,3%	69,3%
Oer-Erkenschwick	5436	8	340,1	252,1	251,2	0,5	74,1%	73,9%
Oerlinghausen	4596	16,5	281,5	137,7	92,7	0,3	48,9%	32,9%
Olfen	3029	18,8	156,7	134,3	133,9	0,3	85,7%	85,4%

Olpe	6051	14,7	457,8	310,8	304,4	0,6	67,9%	66,5%
Olsberg	4303	29,3	328,6	207,6	201,2	0,3	63,2%	61,2%
Ostbevern	2485	33,5	150,1	130,6	127,6	0,4	87,0%	85,0%
Overath	7457	20,2	396,9	291,5	282,5	0,8	73,4%	71,2%
Paderborn	28922	70,4	2.696,2	1.013,4	832,9	5,6	37,6%	30,9%
Petershagen	7879	50,1	477,6	442,8	415,3	0,7	92,7%	86,9%
Plettenberg	6039	30,9	620,6	365,0	365,0	0,6	58,8%	58,8%
Porta Westfalica	10280	33	621,0	435,9	369,2	1,0	70,2%	59,5%
Preußisch Oidend.	3450	15,3	235,2	154,4	29,1	0,2	65,6%	12,4%
Pulheim	15555	17	594,9	172,7	10,7	1,2	29,0%	1,8%
Radevormwald	4634	15,4	358,1	254,9	254,9	0,3	71,2%	71,2%
Raesfeld	2660	19,1	147,8	115,2	90,5	0,5	78,0%	61,2%
Rahden	4196	52,1	315,0	281,7	255,0	0,6	89,4%	80,9%
Ratingen	16603	41,2	1.266,7	497,8	259,1	2,3	39,3%	20,5%
Recke	3008	19	168,4	156,4	156,4	0,2	92,9%	92,9%
Recklinghausen	20112	24,3	1.477,7	1.032,2	1.032,2	0,7	69,9%	69,9%
Rees	6119	31,7	318,6	252,8	249,9	0,4	79,3%	78,4%
Reichshof	6208	20,6	359,4	264,3	230,1	0,5	73,5%	64,0%
Reken	3590	24,4	235,4	165,6	163,6	0,5	70,4%	69,5%
Remscheid	18334	26,1	1.709,5	1.038,1	1.026,6	1,7	60,7%	60,1%
Rheda-Wiedenb.	10730	39,8	695,3	513,3	481,3	1,5	73,8%	69,2%
Rhede	5003	29,3	258,0	203,3	192,3	0,9	78,8%	74,5%
Rheinbach	7573	11,5	409,6	176,8	117,1	1,5	43,2%	28,6%
Rheinberg	8038	22,5	517,6	301,1	281,3	0,7	58,2%	54,3%
Rheine	19213	48,2	1.087,1	730,3	726,4	3,0	67,2%	66,8%
Rheurdt	1838	7,9	83,2	74,9	74,5	0,2	90,0%	89,5%
Rietberg	7223	52,4	546,8	457,4	454,6	1,6	83,7%	83,1%
Rödinghausen	2793	12,1	205,3	167,7	167,1	0,3	81,7%	81,4%
Roetgen	2821	6,5	133,1	122,2	122,0	0,4	91,8%	91,6%
Rommerskirchen	3815	7,8	153,7	124,1	119,7	0,7	80,7%	77,9%
Rosendahl	2937	41,1	194,2	169,9	169,9	0,3	87,5%	87,5%
Rösrath	7415	14	353,5	283,5	282,4	0,5	80,2%	79,9%
Ruppichteroth	3348	15,7	159,0	146,7	146,7	0,2	92,3%	92,3%
Rüthen	3549	25,6	357,0	214,7	202,3	0,2	60,2%	56,7%
Saerbeck	1954	16,6	101,1	90,0	90,0	0,5	89,0%	88,9%
Salzkotten	6806	24,1	428,5	296,5	268,5	1,1	69,2%	62,7%
Sankt Augustin	15089	13,3	678,3	210,3	95,9	1,4	31,0%	14,1%
Sassenberg	3443	23,6	230,1	179,1	174,8	0,7	77,8%	75,9%
Schalksmühle	2794	10,2	224,6	169,1	169,1	0,2	75,3%	75,3%

Schermbeck	3629	34	229,8	118,3	38,3	0,5	51,5%	16,7%
Schieder-Schw.	2687	26,4	195,8	127,7	125,0	0,1	65,3%	63,9%
Schlangen	2602	44,6	155,9	69,5	3,2	0,2	44,6%	2,0%
Schleiden	4497	29,1	259,1	202,5	193,1	0,2	78,1%	74,5%
Schloß Holte-St.	6541	37	391,1	313,9	305,9	1,4	80,3%	78,2%
Schmallenberg	7068	62,8	535,1	404,6	399,7	0,5	75,6%	74,7%
Schöppingen	1755	23,5	119,7	97,0	96,8	0,3	81,0%	80,8%
Schwalmtal	5451	11,5	275,4	198,6	178,2	0,6	72,1%	64,7%
Schwelm	4787	9,3	530,2	248,1	248,1	0,4	46,8%	46,8%
Schwerte	9760	15	640,7	236,4	1,9	1,2	36,9%	0,3%
Selfkant	3803	6,4	144,1	135,2	130,1	0,6	93,8%	90,3%
Selm	6583	20,8	334,1	278,9	278,9	0,7	83,5%	83,5%
Senden	5201	43,2	295,6	244,3	244,3	0,9	82,7%	82,7%
Sendenhorst	3334	37,2	224,8	154,8	152,8	0,5	68,9%	68,0%
Siegburg	9003	7,6	583,1	308,6	307,8	1,1	52,9%	52,8%
Siegen	23097	38,9	1.684,3	1.006,6	1.006,6	2,2	59,8%	59,8%
Simmerath	5214	19,2	315,2	178,4	76,0	0,7	56,6%	24,1%
Soest	10301	21,6	818,2	461,3	461,3	1,1	56,4%	56,4%
Solingen	27229	38,4	2.031,8	1.214,8	1.204,2	2,2	59,8%	59,3%
Sonsbeck	2450	21,5	136,7	92,0	92,0	0,4	67,3%	67,3%
Spenge	4091	18,1	235,4	210,8	210,6	0,3	89,6%	89,5%
Sprockhövel	6353	24,7	455,3	338,3	293,1	0,6	74,3%	64,4%
Stadtlohn	5465	28,8	328,5	231,8	215,6	0,9	70,6%	65,6%
Steinfurt	9530	41	649,8	499,5	495,2	1,2	76,9%	76,2%
Steinhagen	4811	29,1	311,0	225,4	207,6	0,7	72,5%	66,8%
Steinheim	3795	17	315,9	172,5	169,6	0,2	54,6%	53,7%
Stemwede	3907	45,5	336,1	311,8	296,5	0,5	92,8%	88,2%
Stolberg (Rhld.)	13602	31,3	904,3	573,7	540,9	1,0	63,4%	59,8%
Straelen	4335	22,7	858,5	407,4	373,7	2,7	47,5%	43,5%
Südlohn	2469	15,9	181,5	118,1	116,1	0,6	65,1%	64,0%
Sundern (Sauerl.)	7701	44,1	665,7	412,9	398,9	1,0	62,0%	59,9%
Swistal	5937	11,3	268,4	56,0	25,8	0,4	20,9%	9,6%
Tecklenburg	2737	28,2	162,7	145,5	121,1	0,2	89,4%	74,4%
Telgte	4952	34,6	295,2	225,4	213,4	0,7	76,3%	72,3%
Titz	2957	12,4	149,6	86,3	86,3	0,3	57,7%	57,7%
Tönisvorst	7590	16,7	425,2	192,2	87,2	0,7	45,2%	20,5%
Troisdorf	16604	35	1.107,0	279,5	179,9	2,1	25,2%	16,3%
Übach-Palenberg	6403	6,4	289,4	196,6	196,6	0,7	67,9%	67,9%
Uedem	2459	17,9	129,2	87,7	85,3	0,4	67,9%	66,0%

Unna	12866	23,6	821,6	457,4	457,1	2,2	55,7%	55,6%
Velbert	14217	40,7	1.352,1	835,1	835,1	1,7	61,8%	61,8%
Velen	3237	28,1	178,9	157,8	154,3	0,5	88,2%	86,3%
Verl	5937	33,5	401,5	333,7	330,3	1,2	83,1%	82,3%
Versmold	5147	39	345,7	307,4	299,8	0,5	88,9%	86,7%
Vettweiß	2990	16,5	116,9	103,9	101,6	0,2	88,9%	86,9%
Viersen	17876	29,4	1.208,9	641,5	519,5	1,9	53,1%	43,0%
Vlotho	5570	35	374,9	271,4	245,6	0,3	72,4%	65,5%
Voerde (Niederr.)	7910	19,5	544,4	294,6	192,7	0,8	54,1%	35,4%
Vreden	6220	52,9	353,7	292,5	292,5	1,0	82,7%	82,7%
Wachtberg	6009	11,1	281,3	192,3	191,4	0,6	68,4%	68,1%
Wachtendonk	2280	12,7	151,7	120,8	120,8	0,4	79,7%	79,7%
Wadersloh	3356	42,5	221,2	183,3	183,3	0,5	82,8%	82,8%
Waldröhl	5553	13,8	352,4	286,4	286,4	0,4	81,3%	81,3%
Waldfeucht	3060	4,9	133,6	110,7	83,1	0,3	82,9%	62,2%
Waltrrop	6152	17,4	330,4	260,9	260,9	0,7	79,0%	79,0%
Warburg	7138	65,5	564,5	341,7	337,4	0,5	60,5%	59,8%
Warendorf	9709	66,3	657,0	474,4	463,0	1,1	72,2%	70,5%
Warstein	8107	30,3	543,7	367,2	349,8	0,9	67,5%	64,3%
Wassenberg	5522	7,6	224,6	167,2	135,9	0,8	74,5%	60,5%
Weeze	2809	34,2	222,4	138,0	135,9	0,6	62,0%	61,1%
Wegberg	9100	16,7	441,2	299,0	200,1	0,8	67,8%	45,4%
Weilerswist	4838	10	208,2	33,3	29,1	0,4	16,0%	14,0%
Welper	3759	17,1	191,4	180,5	180,5	0,2	94,3%	94,3%
Wenden	5591	9,1	338,2	272,6	271,8	1,0	80,6%	80,4%
Werdohl	3704	15,4	437,6	215,6	215,6	0,2	49,3%	49,3%
Werl	7038	17,7	537,4	282,3	281,6	1,1	52,5%	52,4%
Wermelskirchen	8549	12,4	569,6	369,7	332,4	0,7	64,9%	58,4%
Werne	6874	28,1	416,6	322,4	322,4	0,7	77,4%	77,4%
Werther (Westf.)	2754	19,1	201,5	155,6	153,3	0,3	77,2%	76,1%
Wesel	14170	38,2	946,7	553,1	471,5	2,2	58,4%	49,8%
Wesseling	7509	12	550,9	273,0	272,8	0,9	49,6%	49,5%
Westerkappeln	3032	27,3	182,3	162,4	162,4	0,5	89,1%	89,1%
Wetter (Ruhr)	5672	14,5	548,0	303,5	271,0	0,8	55,4%	49,4%
Wettringen	2228	18,9	123,2	103,6	100,8	0,6	84,1%	81,8%
Wickede (Ruhr)	2776	7,3	202,9	135,9	118,5	0,2	67,0%	58,4%
Wiehl	7684	11,5	446,6	361,8	357,9	1,0	81,0%	80,1%
Willebadessen	2736	32,4	172,6	132,5	128,3	0,1	76,7%	74,3%
Willich	13500	22,4	775,2	355,6	167,3	2,2	45,9%	21,6%

Wilnsdorf	6241	11,5	340,0	290,3	290,3	0,5	85,4%	85,4%
Windeck	7347	23	350,7	305,4	305,4	0,4	87,1%	87,1%
Winterberg	4609	32,4	338,7	240,2	235,9	0,6	70,9%	69,6%
Wipperfürth	5540	27,4	377,2	255,3	233,1	0,7	67,7%	61,8%
Witten	17140	34,2	1.660,4	856,5	691,7	0,9	51,6%	41,7%
Wülfrath	3854	16	319,1	195,8	195,8	0,4	61,4%	61,4%
Wuppertal	50360	83,2	5.071,9	2.218,0	2.216,0	4,8	43,7%	43,7%
Würselen	8588	9,3	570,5	381,5	376,2	0,3	66,9%	66,0%
Xanten	5938	28,2	288,2	230,7	218,2	0,6	80,1%	75,7%
Zülpich	6248	12,2	294,8	214,9	191,2	0,8	72,9%	64,8%

Anhang 3: Aggregierte Daten auf Kreisebene

Name	Besitz- stücke	Fläche [km ²]	Gebäude- bedarf	Technisches Potenzial [GWh/a]			Deckungsanteil	
				Szenario A	Szenario B	Neubau	Szenario A	Szenario B
Bielefeld	55175	144,1	5.308,2	2.796,6	2.673,4	6,6	52,7%	50,4%
Bochum	50996	79,9	5.314,7	2.853,9	2.806,3	4,6	53,7%	52,8%
Bonn	56266	57,5	4.555,2	1.551,9	1.494,7	8,3	34,1%	32,8%
Borken	95455	528,1	5.595,6	4.120,4	3.896,6	18,1	73,6%	69,6%
Bottrop	19886	34	1.409,9	918,3	851,4	1,5	65,1%	60,4%
Coesfeld	55640	425,4	3.385,4	2.676,4	2.623,8	7,5	79,1%	77,5%
Dortmund	79551	117,2	8.089,0	3.671,7	3.602,4	13,3	45,4%	44,5%
Duisburg	67752	113,5	6.107,5	3.192,0	3.062,2	10,5	52,3%	50,1%
Düren	73425	252,1	4.530,6	2.666,1	2.548,4	6,3	58,8%	56,2%
Düsseldorf	60842	129,3	9.418,7	2.765,0	2.353,0	12,6	29,4%	25,0%
Ennepe-Ruhr-Kr.	63781	187,7	5.920,1	3.470,0	3.194,4	5,3	58,6%	54,0%
Essen	77554	106,6	7.917,7	4.248,1	4.196,7	10,0	53,7%	53,0%
Euskirchen	59916	212	3.065,2	2.155,1	2.018,5	5,3	70,3%	65,9%
Gelsenkirchen	31083	61,9	3.536,0	1.775,3	1.769,5	3,2	50,2%	50,0%
Gütersloh	83842	438,8	5.775,2	4.346,9	4.127,7	14,0	75,3%	71,5%
Hagen	27031	55,8	3.188,9	1.527,8	1.485,9	3,1	47,9%	46,6%
Hamm	35650	71,7	2.383,2	1.631,5	1.631,5	6,0	68,5%	68,5%
Heinsberg	75539	117,7	3.792,5	2.748,0	2.467,9	8,6	72,5%	65,1%
Herford	64374	187,1	4.202,4	3.232,9	3.025,0	6,6	76,9%	72,0%
Herne	20464	23,8	1.970,1	1.128,6	1.128,6	1,1	57,3%	57,3%
Hochsauerlandkr.	72566	463,9	5.828,3	3.639,1	3.502,1	7,2	62,4%	60,1%
Höxter	44207	354,2	3.195,0	1.997,4	1.891,3	2,9	62,5%	59,2%
Kleve	88584	404,8	6.201,0	4.121,6	3.965,6	14,8	66,5%	64,0%
Köln	121316	181,7	12.820,7	3.816,9	2.674,0	16,6	29,8%	20,9%
Krefeld	42462	54	3.782,4	1.487,5	1.090,6	2,9	39,3%	28,8%
Leverkusen	24411	34,1	2.124,5	1.231,2	1.184,0	2,7	58,0%	55,7%
Lippe	95513	486,7	7.065,9	4.271,9	3.618,5	6,5	60,5%	51,2%
Märkischer Kreis	91882	309,8	8.140,8	4.721,6	4.280,2	5,7	58,0%	52,6%
Mettmann	91604	184,8	7.132,0	3.656,4	3.108,1	10,5	51,3%	43,6%
Minden-Lübbecke	81637	333,9	5.542,1	4.136,8	3.517,4	7,8	74,6%	63,5%
Mönchengladb.	51547	54,2	3.454,8	1.445,0	965,5	6,4	41,8%	27,9%
Mülheim a.d.R.	27179	41,4	2.593,7	1.312,5	1.218,3	3,7	50,6%	47,0%
Münster	54924	146,4	4.657,6	2.564,8	2.429,3	12,0	55,1%	52,2%
Oberberg. Kreis	75087	224,1	4.633,9	3.545,6	3.473,2	5,6	76,5%	75,0%
Oberhausen	32329	40,8	2.320,3	1.456,4	1.456,4	2,6	62,8%	62,8%

Olpe	35339	107,7	2.466,0	1.689,7	1.624,8	4,9	68,5%	65,9%
Paderborn	69424	339,5	5.623,5	2.909,3	2.560,4	12,1	51,7%	45,5%
Recklinghausen	119672	222,7	7.567,6	5.182,0	4.958,8	10,4	68,5%	65,5%
Remscheid	18334	26,1	1.709,5	1.038,1	1.026,6	1,7	60,7%	60,1%
Rhein-Erft-Kreis	114104	173,3	6.027,7	1.832,3	1.492,7	8,8	30,4%	24,8%
Rhein.-Berg. Kreis	68330	131	3.910,5	2.494,0	2.208,0	6,1	63,8%	56,5%
Rhein-Kr. Neuss	99029	131,4	6.848,0	3.066,4	2.325,0	10,9	44,8%	34,0%
Rhein-Sieg-Kreis	166688	268,5	8.525,6	4.374,7	3.722,6	17,0	51,3%	43,7%
Siegen-Wittg.	74601	273,3	4.863,1	3.348,1	3.334,8	6,7	68,8%	68,6%
Soest	76959	292,6	5.517,4	3.691,9	3.564,0	9,3	66,9%	64,6%
Solingen	27229	38,4	2.031,8	1.214,8	1.204,2	2,2	59,8%	59,3%
Städtere. Aachen	114701	182,5	8.090,4	4.718,6	4.421,5	12,9	58,3%	54,7%
Steinfurt	116085	630,8	6.850,7	5.308,6	5.105,4	19,0	77,5%	74,5%
Unna	83306	165,7	5.089,3	3.350,1	2.980,1	9,9	65,8%	58,6%
Viersen	79016	175	4.817,6	2.747,5	2.133,7	8,2	57,0%	44,3%
Warendorf	68401	485,5	4.657,5	3.390,6	3.352,0	9,2	72,8%	72,0%
Wesel	105112	363,1	6.469,4	4.252,5	3.760,5	11,1	65,7%	58,1%
Wuppertal	50360	83,2	5.071,9	2.218,0	2.216,0	4,8	43,7%	43,7%

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

