Konzeptstudie Straßentemperierung

Wunsiedler Straße

Stadt Marktredwitz

Diese Studie wurde erstellt von:

Uwe Täuber

Markus Ruckdeschel

Alexander Burkel

ENERGIEAGENTURnordbayern GmbH

Kressenstein 19

D-95326 Kulmbach

Fon. 0 92 21 / 82 39 - 0

Fax. 0 92 21 / 82 39 – 29

E-Mail: kulmbach@ea-nb.de

www.energieagentur-nordbayern.de

Diese Studie wurde gefördert: (Förderkennzeichen:)

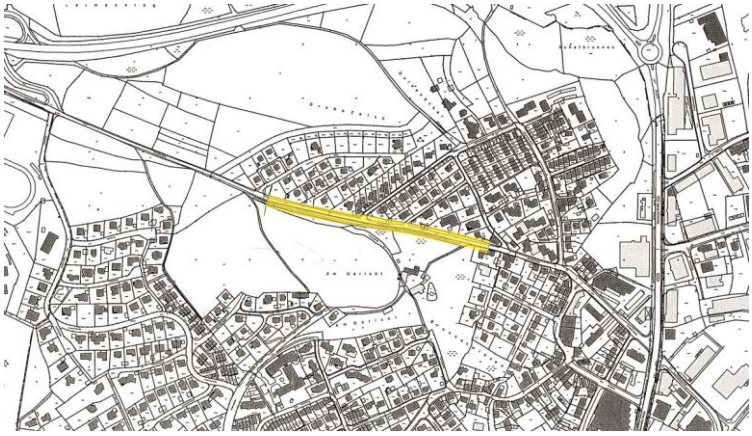
Gefördert durch die Bundesrepublik Deutschland, Zuwendungsgeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages.

Nürnberg, April 2012

Straßentemperierung:

Wunsiedler Straße Marktredwitz



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 5
1. Ausgangslage Marktredwitz 6
2.1 Geographische Voraussetzungen 6
2.2 Solare Ausrichtung 7
2.3 Wetterbedingungen 8
3. Grundprinzip der Straßentemperierung 9
4. Technische Möglichkeiten 11
4.1 Geothermie mit Wärmepumpe 11
4.2 Geothermie mit Wärmespeicher 13
4.3 Nutzung des Grundwassers 14
4.4 Mess-, Steuer- und Regelsystem 14
4.5 Fazit der technischen Betrachtung 17
5. Auslegung 17
5.1 Straßenbelag 17
5.2 Betrachtung des Wärmebedarfs 19
5.3 Geothermie mit Wärmepumpe 19
6. Kosten 20
6.1 Investitionen 21
6.2 Betriebskosten 22
6.3 Gegenüberstellung: Erdwärmespeicher, Wärmepumpe 23
7. Kostendämpfende Aspekte 25
7.1 Erhöhung der Verkehrssicherheit 25
7.2 Entlastung des Winterdienstes 25
7.3 Lebensdauer der Straße 27
8. Zusammenfassung 29
9. Abbildungsverzeichnis 32
10. Tabellen und Diagramme 33
11. Anhang 34

1. Einleitung

Erneuerbare Energien, CO_2-Belastung, Energiesparen, Energiewende. Diese Reizwörter sind momentan in aller Munde. Vor allem seit der Reaktorkatastrophe von Fukushima fand ein Umdenken in der Gesellschaft statt, was sich letztlich auch auf die Politik auswirkte. Die Stadt Marktredwitz hat noch vor diesen tragischen Ereignissen die Herausforderungen erkannt. Mit der Erstellung des Integrierten Klimaschutzkonzeptes über die Energieagentur Nordbayern wurde hierbei ein erster entscheidender Schritt in eine erneuerbare Zukunft gemacht.

Dabei können alternative Energieformen auch in Bereichen eingesetzt werden, die auf den ersten Blick nicht unbedingt naheliegend sind, zum Beispiel bei der Steigerung der Verkehrssicherheit. Der Einsatz von Räumfahrzeugen sowie Streusalz und Rollsplitt erfordert besonders in den schneereichen Regionen Deutschlands jährlich einen hohen Aufwand an Energie und finanziellen Mitteln. Marktredwitz im Fichtelgebirge ist bedingt durch die geographische Lage besonders betroffen. Im Rahmen dieser Studie soll eine technische und wirtschaftliche Lösung untersucht werden, ein Teilstück der Wunsiedler Straße so zu temperieren, dass es auch bei Frost und Wintereinbruch durchgängig sicher befahrbar bleibt. Zusätzlich soll der Straße im Sommer Wärme entzogen werden, um den Fahrbahnverschleiß durch hohe Temperaturen zu minimieren.

Zunächst mag es vielleicht widersinnig klingen, eine Straße zu heizen. Bei näherer Betrachtung aber dient es der Sicherheit und störungsfreien Verkehrsabläufen, besonders bei steilen und eisgefährdeten Strecken. Dazu finden sich neben den bereits angesprochenen verminderten Schneeräumungsaufwand noch andere Synergieeffekte, wie beispielsweise eine längere Lebensdauer der Straße. Eine Realisierung dieses Ziels über den Einsatz fossiler Energieträger oder eine Stromflächenheizung wäre im Rahmen der Energiewende natürlich eher kontraproduktiv.

Erdwärme als ständig verfügbare Energiequelle ist im Gegensatz dazu jedoch CO_2 neutral. So findet sich bereits ab einer Tiefe von ca. zehn Metern unter der Erdoberfläche eine über das gesamte Jahr konstante Temperatur von etwa zehn Grad[1]. Darüber hinaus verfügt Marktredwitz über geeignete geologische Verhältnisse, die eine Speicherung der im Sommer anfallenden Wärme im Erdreich begünstigen. So kann der Belag im Sommer gekühlt werden, und die dabei anfallende Wärme später im Winter zur Temperierung eingesetzt werden. Das Konzept ist grundsätzlich nicht neu, es gibt in der Schweiz, Japan, den USA und den Niederlanden[2] bereits erprobte Fahrbahnheizungen.

Ob ähnliche Konzepte in Marktredwitz zu realisieren sind und welche dabei in Frage kommen, ist Gegenstand dieser Untersuchung. Die Studie ist dabei lediglich als Planungsgrundlage zu sehen, ersetzt also keinesfalls eine intensive Prüfung vor einer

---

1 Linda Caroline Meier: Geothermie die alternative Energiequelle aus der Tiefe. http://www.geoberlin.de/downs/Geothermie.pdf Abrufdatum: 18.11.11

2 Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung NRW: GeoVerSi Studie vom 16.06.05 Abrufbar unter: http://www.geoversi.nrw.de/ Abrufdatum 18.11.11

möglichen Umsetzung. Hierbei wird es immer zur Abweichung einzelner Parameter kommen, die dementsprechend auch Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Projektes haben können.

Vorab wurden einige Auslegungen von der Firma REHAU übernommen, da sich das hauseigene geothermische System zur Brückenheizung bereits in der Praxis bewähren konnte.

1. Ausgangslage Marktredwitz

2.1 Geographische Voraussetzungen

Marktredwitz ist eine 17.351 Einwohner[3] große Stadt im Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge. Die Stadt liegt auf 522m über dem Meeresspiegel.[4] Obwohl Marktredwitz noch zum Fichtelgebirge (Oberfranken) gehört, grenzt es im Süden unmittelbar an den Oberpfälzer Wald.

Für die Temperierung soll ein Teilstück der Wunsiedler Straße hergenommen werden. Die Wunsiedler Straße verläuft von der Fichtelgebirgsstraße direkt in das Zentrum der Stadt Marktredwitz.

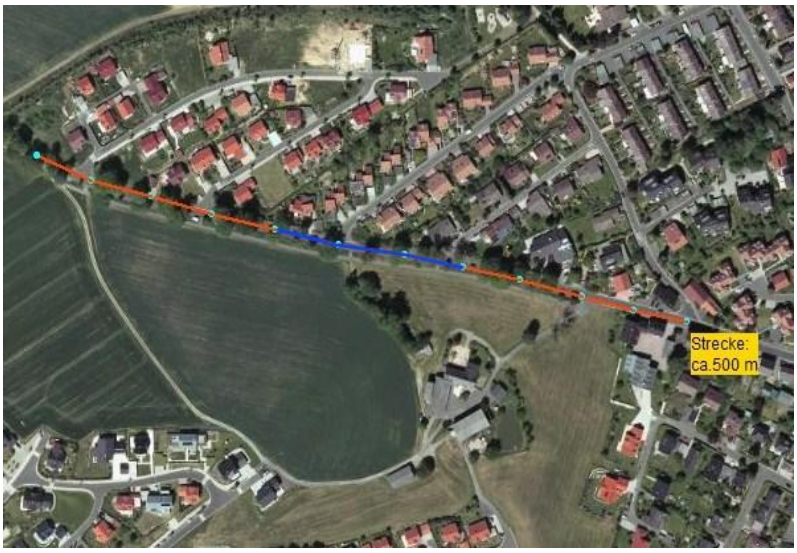


Abbildung 1: Straßenverlauf, Teilstrecke

In Absprache mit der Stadt wurde ein Straßenabschnitt von 500m Länge näher betrachtet. Dabei stellte sich heraus, dass vor allem im blau markierten Bereich (Bild 1) eine Temperierung der Wunsiedler Straße sinnvoll ist.

3 Homepage der Stadt Marktredwitz. http://www.marktredwitz.de/20_Daten.html Abrufdatum 18.11.11

4 Wikipedia – Marktredwitz. http://de.wikipedia.org/wiki/Marktredwitz Abrufdatum 21.11.11

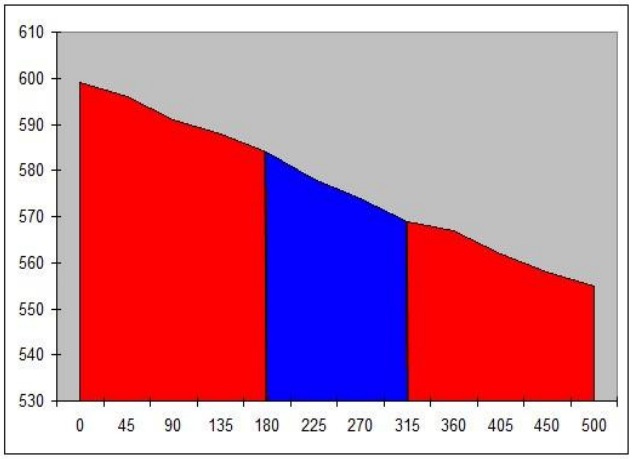


Diagramm 1: Höhenverlauf Wunsiedler Straße

Dieser Streckenabschnitt hat ein besonders hohes Gefälle (Diagramm 1). Zudem finden sich innerhalb dieser Teilstrecke von ca. 135m Länge zwei T-Kreuzungen, die in das angrenzende Wohngebiet führen. Bei einer mittleren Straßenbreite von ca. 5 m ergibt sich somit eine Fläche von 675 m², bei der eine Temperierung sinnvoll wäre.

Das Gebiet südlich der Straße unterliegt landwirtschaftlicher Nutzung. Ob die an die Straße angrenzenden Gebiete für Anlagenteile der Straßentemperierung, etwa für eine Pumpenstation, oder für unterirdische Wärmespeicher zur Verfügung stehen, muss einzeln geprüft werden.

Marktredwitz besitzt einen festen Untergrund, welcher die Kosten für Bohrarbeiten verteuert. Dem gegenüber steht die gute spezifische Erdwärmesondenentzugsleistung mit geschätzten 60-70 W/m. Durch die gute Wärmeleitung des Bodens wird im Umkehrschluss auch die Einbringung von Wärme, also die Wärmespeicherung, begünstigt.

2.2 Solare Ausrichtung

Die Straße verhält sich im weitesten Sinne wie ein lang gezogener Solarkollektor. Die Wunsiedler Straße verläuft in West-Ost-Richtung. So hat sie generell gute Voraussetzungen, um einen möglichst hohen Strahlungsertrag zu ernten. Zusätzlich muss man die Steigung der Straße in West-Richtung betrachten. Die Straße hat eine Steigung von ca. 11%, was einem Anstellwinkel von 6,4° entspricht. Dieses Gefälle begünstigt die solaren Strahlungsgewinne in den Morgenstunden und am Vormittag – die Sonne steht im Osten. Sie verschlechtert jedoch die Bedingungen am Abend – dann steht die Sonne im Westen. Während der gesamten Mittagsstunden, wenn die Sonne hauptsächlich im Süden steht, kann der Belag trotz der West-Ost Neigung einiges an Solarenergie ernten. Eine Verschattung aus Südrichtung in Form von hohen Gebäuden ist nicht gegeben und verbessert somit die Ausgangslage. Jedoch wurde die Wunsiedler Straße als Allee angelegt. Der Baumbestand (vgl. Bild 1) am Straßenrand in Südrichtung verschattet den Belag stark. Aus rein energetischer Sicht wäre

eine Fällung des Baumbestands in diesem Abschnitt natürlich zu empfehlen. Allerdings sprechen ökologische Aspekte dagegen.

2.3 Wetterbedingungen

Aufgrund der geographischen Lage der Stadt Marktredwitz kommt es hier im Winter zu erheblichen Niederschlägen in Form von Schnee. Zwischen November und März bewegen sich die Monatsmitteltemperaturen um den Gefrierpunkt.

Art	Einheit	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Temperatur	°C/Monat	-2,9	-1,9	1,5	5,6	10,6	13,8	15,4	14,9	11,7	7,3	1,9	-1,5
Niederschlag	l/mm²/Mon.	55,5	45,4	49,5	57,2	71,7	77,4	74,0	79,7	53,4	53,5	57,2	67,6
Sonnenstunden	h/Monat	44,8	72,4	112,3	149,2	195,0	198,1	207,7	195,5	156,3	120,7	51,7	38,1

Tabelle 1: Klima DWD (im Mittel 1961-1990)

Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur in Deutschland beträgt 8,1°C. In Marktredwitz beträgt sie hingegen lediglich 6,4°C. Dazu kommt ein Niederschlag von insgesamt 731l im Jahr. Der deutschlandweite Mittelwert liegt bei rund 800l/a.

Mit insgesamt 1540 Sonnenstunden im Jahr liegt Marktredwitz genau im deutschen Mittel. Auf Grund der örtlichen Gegebenheiten wiederholen sich Winterszenen, wie in Bild 2 zu sehen, nahezu jährlich.

Zudem muss man einberechnen, dass die Klimadaten aus Tabelle 1 während der Jahre 1961-1990 aufgenommen wurden. Die vergangen Jahre zeigen jedoch eine auffällige Häufung an Wetterextremen, die auch auf den Klimawandel zurückzuführen sind. Obwohl man davon ausgeht, dass sich im Jahresdurchschnitt bis zum Ende dieses Jahrhunderts eine Zunahme der Temperaturen von ca. 3,2°C einstellen wird, wird die Anzahl der Schneetage nahezu konstant bleiben.[5] Auch zukünftig werden wir mit sehr heißen Sommern und lang anhaltenden Kälteperioden wie beispielsweise im Winter 2010/2011 rechnen müssen.

5 Regionaler Klimaatlas Deutschland http://www.regionaler-klimaatlas.de/ aufgerufen am 22.11.11

Abbildung 2: Winter in Marktredwitz

3. Grundprinzip der Straßentemperierung

Die wesentlichen Anlagenkomponenten bleiben unabhängig von der technischen Ausführung in jedem Fall bestehen:[6]

I. Energiequelle

II. Wärmetauscher oder Heizelemente, welche in den Belag eingebettet sind.

III. Sensoren zum Ermitteln der örtlichen Wetterdaten
(z.B. Lufttemperaturen, Feuchtigkeit, Strahlungswerte)

IV. Steuereinrichtung zur Regelung der Heizelemente

Die Energiequelle gibt ihre Energie in Form von Wärme an den Wärmetauscher im Straßenbelag weiter. Als Wärmetauscher werden Rohre unterhalb der Asphaltdeckschicht verlegt. Sensoren messen in regelmäßigen Abständen die örtlichen Gegebenheiten, beispielsweise um Blitzeis schon im Voraus zu vermeiden. Hierbei ist es notwendig, einen Straßenbelag schon bei niedrigen positiven Temperaturen zu heizen. Um die Wärme des Wassers im Rohrsystem unter dem Asphalt an den Belag weiterzuleiten, vergehen ca. 1-2 Stunden.[7]

Eine Autobahnbrücke mit temperiertem Belag in der Schweiz wird beispielsweise ab einer Belagstemperatur von ≤ +3°C beheizt.[8] Da Brücken als freistehende Bauwerke schneller auskühlen als Straßen, könnte in der Praxis diese Temperaturschwelle für den Heizbeginn

6 Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung NRW: GeoVerSi Studie. 16.06.05 S.19 Abrufbar unter: http://www.geoversi.nrw.de/ abgerufen am 18.11.11

7 Vgl. Burkhard Strassmann: Die geheizte Brücke. Zeit Online 08.03.2007 abrufbar unter http://www.zeit.de/2007/11/T-Bruecke

8 Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung NRW: GeoVerSi Studie. 16.06.05 S.71 Abrufbar unter: http://www.geoversi.nrw.de/ abgerufen am 23.11.11

noch etwas gesenkt werden. Um die Belagstemperierung noch präziser steuern zu können, ist gezieltes Arbeiten mit meteorologischen Prognosemodellen und aktuellen Klimadaten unausweichlich. In jedem Fall ist es sinnvoll, eine sogenannte Schalthysterese, also eine Verzögerung, von ca. 1°C in die Regelung mit einzubeziehen, um unnötig viele Schaltvorgänge bei Temperaturen im Bereich der Temperaturschwelle zu vermeiden.

Wie viel Wärme dem Belag im Winter tatsächlich zugeführt werden muss, ist von mehreren Faktoren abhängig, aber vor allem bedingt durch die grundsätzliche Auslegung auf Eisfreihaltung mit oder ohne Schneeschmelze.

Die nötige Wärme zur Temperierung der Straße soll in dieser Betrachtung mit Hilfe der Geothermie bereit gestellt werden. Unter Umständen müssen hierbei noch Wärmepumpen eingesetzt werden, die das Temperaturniveau der aus dem Erdreich entnommenen Wärme erhöhen. Die wesentlichen technischen Unterschiede im Bereich der Wärmebereitstellung und Speicherung werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

Die geothermisch verfügbare Energie gehört zu den regenerativen Energiequellen. Es handelt sich um eine unendliche und frei zur Verfügung stehende Energie. Der Ursprung dieser Wärme ist vor allem auf radioaktive Zerfallsprozesse im Erdkern sowie auf die Restwärme der Erdentstehung zurückzuführen. Besonders in oberflächennahen Erdschichten bis 20m hat allerdings die durch Sonnenstrahlung eingebrachte Wärme den größten Anteil. Dabei ist egal, ob diese direkt durch Bestrahlung des Erdbodens oder beispielsweise durch einsickerndes Regenwasser in den Untergrund eingebracht wird.[9]

Die Bodentemperatur nimmt im Mittel um 1°C je 30m zu. Der geothermische Wärmefluss liegt in Bayern bei rund 0,065 W/m².[10] Es leuchtet ein, dass es sich bei geothermischer Wärmenutzung in erster Linie um eine Nutzung bereits gespeicherter Wärmemengen handelt. Die Nutzung oberflächennaher Erdwärme (bis 400m Bohrtiefe) ist also nur dann regenerativ, wenn dem Erdboden im Jahresmittel nicht mehr Energie entnommen wird, als durch die natürlichen Energietransportvorgänge während der sommerlichen Regenerationszeit wieder zufließen kann. Mittels aktiver Regeneration kann man diese Transportvorgänge noch unterstützen. Hierbei wird die im Sommer überschüssige Wärme in den Boden eingebracht. Bei korrekter Auslegung kann eine Auskühlung des Bodens vermieden werden.

9 Vgl. http://www.energiewechseln.de/ratgeber/oekostrom/geothermie/ursprung/ abgerufen am 21.11.11

10 Vgl. Bayrisches Landesamt für Umwelt: Geoth. in BY. http://www.lfu.bayern.de/geologie/geothermie/index.htm abgerufen am 22.11.11

4. Technische Möglichkeiten

4.1 Geothermie mit Wärmepumpe

Eine Straßentemperierung mit Wärmepumpenunterstützung hat den Vorteil, dass sich die Anzahl der Sondenbohrungen bzw. die Kollektorfläche reduziert, was sich auch in der Investitionssumme widerspiegelt. Das System wird dadurch zusätzlich kompakter, darüber hinaus verringert sich der Planungsaufwand. Allerdings müssen immer der Stromverbrauch für die Wärmepumpe im Betrieb sowie deren Anschaffungspreis und erhöhte Wartungskosten mit in die Betrachtung einfließen.

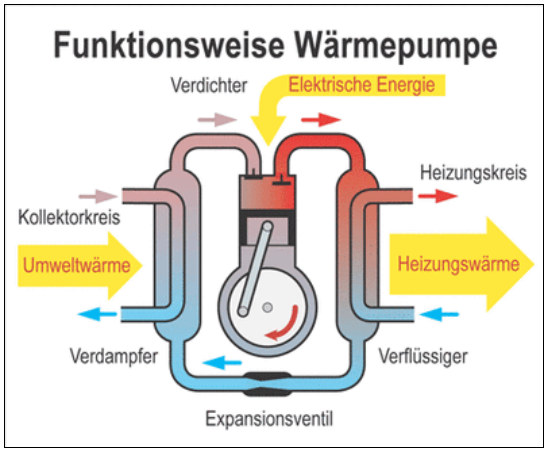


Abbildung 3: Funktionsweise einer Wärmepumpe

Bild 3 verdeutlicht die Funktionsweise einer Wärmepumpe, wie sie im Winterbetrieb zur Straßenbeheizung arbeiten würde. Sie sitzt zwischen zwei hydraulischen Kreisläufen. Der Kollektorkreis wird im Falle der Straßentemperierung mit der geothermischen Wärmequelle verbunden. Die daran angeschlossene Wärmepumpe entzieht dem Kollektorkreis Wärme und erhöht unter Einsatz elektrischer Energie diese Temperatur, bevor sie letztlich an den Heizkreis weitergegeben wird. Der Heizkreis ist mit dem Rohrkollektor unterhalb des Straßenbelags verbunden.

Im Sommerbetrieb muss die Wärmepumpe nicht arbeiten. Die beiden Kreisläufe müssen mittels Wärmetauscher verbunden werden. Überschüssige Straßenwärme sollte in die Bohrlöcher geführt werden, um der Sondenauskühlung entgegenzuwirken. Man spricht hierbei von aktiver Regeneration. So kann gleichzeitig der Wirkungsgrad der Wärmepumpe gesteigert und damit der Strombedarf im Winter verringert werden.

Wärmepumpen lassen sich prinzipiell auch mit Flächenkollektoren sehr gut kombinieren. Flächenkollektoren werden nach VDI 4640 in ca. 1,2-1,5m Tiefe verlegt. Die Bodentemperatur in dieser Tiefe unterliegt sehr stark den regionalen Schwankungen. So liegt die Temperatur in 1,5m Tiefe im März bei ca. 2°C, während sie im September 15°C erreicht. Die Regeneration der zur Straßenheizung entzogenen Energie erfolgt hauptsächlich durch Sonneneinstrahlung und Regenwasser. Der schlechtere Wirkungsgrad einer Wärmepumpe in

Kombination mit Flächenkollektoren im Vergleich zu Erdwärmesonden ist auf eben diese großen jahreszeitlichen Schwankungen zurückzuführen.

Hierdurch ergeben sich zwei weitere Probleme beim Einsatz von Erdwärmekollektoren: Zum Einen eine uneffektivere Kühlung der Belagsoberfläche im Sommer, zum Anderen keine Möglichkeit zur Speicherung dieser anfallenden Wärme im Untergrund.

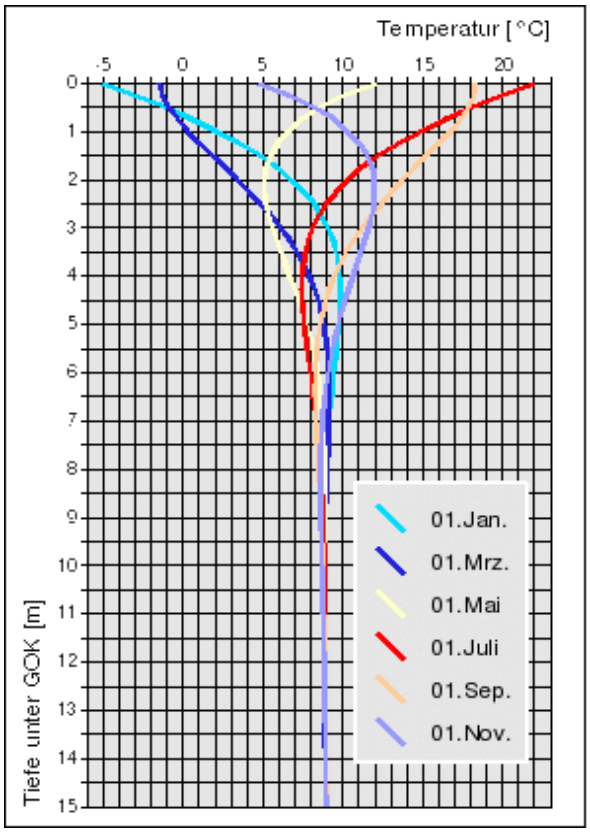


Abbildung 4: Bodentemperatur in Abh. von der Teufe

Beim Einsatz von Erdwärmesonden zirkuliert die Sole (Wärmeträgerflussigkeit) des Kollektorkreises in vertikal in den Boden eingebrachten Rohrleitungen. Die Sonde dient hierbei als langer Wärmetauscher, der die Erdwärme erntet bzw. Wärme in die Erde einspeisen kann. Durch nahezu konstante Temperaturen im Erdreich, ab einer Tiefe von 10m unter der Geländeoberkante (GOK), kann so auch die Wärmepumpe im Winter wesentlich effektiver arbeiten. Die Speicherung von Wärme im Erdreich wird ebenfalls begünstigt. Der Großteil der in der Studie GeoVerSi vorgestellten Projekte nutzt daher vertikale Erdwärmesonden zur Oberflächentemperierung.[11]

11 Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung NRW: GeoVerSi Studie. 16.06.05 Abrufbar unter: http://www.geoversi.nrw.de/ abgerufen am 18.11.11

4.2 Geothermie mit Wärmespeicher

Erdwärmespeicher dienen einerseits im entladenen Zustand als Kältelieferant für die sommerliche Straßenkühlung, und zum anderen als Wärmelieferant während der Betriebszeit in den Wintermonaten.

Soll die Straßenheizung ganz ohne Wärmepumpe betrieben werden, ist ein groß dimensionierter Erdwärmespeicher die einzig sinnvolle Lösung. Prinzipiell würden sich auch Kesselspeicher oder Niedrigtemperatur-Latentwärmespeicher eignen. In der Praxis bewährt haben sich jedoch Erdwärmesondenspeicher. Tiefe und Anzahl der Erdbohrungen müssen in der Planung getrennt berechnet werden. Diese Parameter hängen ebenfalls maßgeblich vom erwünschten Ziel – Schneeschmelze oder Eisglättevorbeugung ab.

Als Beispiel lässt sich das Schweizer Projekt SERSO zur Eisvermeidung des Belags einer Brücke der A8 im Berner Oberland nennen. Die nötige Wärme zur Beheizung der Belagsfläche von 1300m² wird über einen Ringwärmespeicher-Verbund aus mehreren Erdwärmesonden mit einer Länge von je 65m bereitgestellt. Dafür wurden 91 Sonden in das Felsgestein getrieben. So kommt ein Speichervolumen von 55.000m³ zu Stande. Zum Vergleich: Die größten im Hausgebrauch verwendeten Warmwasserspeicher, wie sie vereinzelt bei Solarhäusern zum Einsatz kommen, besitzen ein Volumen von ca. 30m³. Auch wenn diese Wärmespeicher in der Lage sind, ein vielfach höheres Temperaturniveau zu halten, ist der Einsatz von Kesselspeichern nicht wirtschaftlich darstellbar.

Die Erfahrungen in der Schweiz haben gezeigt, dass sich die Wassertemperatur in den im Fels eingebrachten Erdwärmesonden nach Ende des Sommers auf ca. 20°C erhöht hat.[12] Mit diesen gespeicherten Wärmemengen kann dort den ganzen Winter der Straßenbelag eisfrei gehalten werden, wofür eine Vorlauftemperatur im Bereich von 6 – 10°C genügt.

12 Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung NRW: GeoVerSi Studie. 16.06.05 S70 Abrufbar unter: http://www.geoversi.nrw.de/ abgerufen am 18.11.11

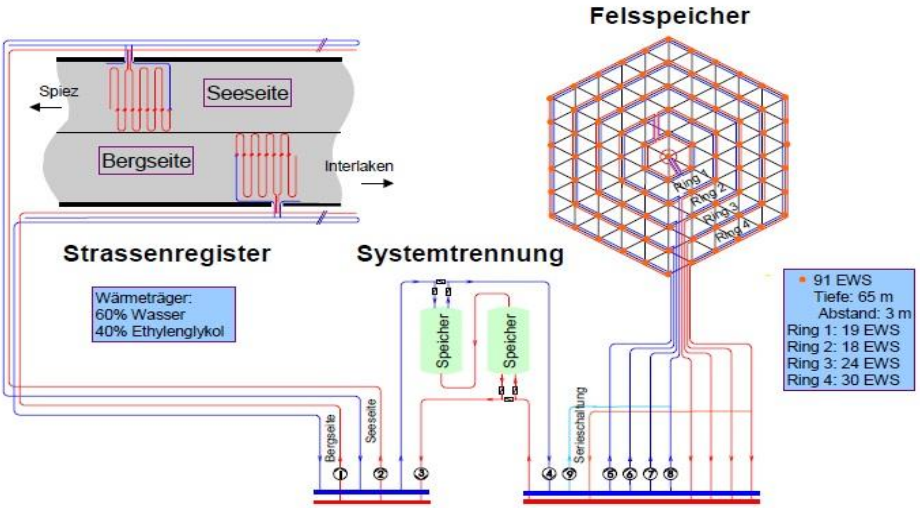


Abbildung 5: Prinzipschema SERSO Brückenenteisung Schweiz

4.3 Nutzung des Grundwassers

Eine Weitere Möglichkeit, Wärme unter der Erdoberfläche zu gewinnen, ist die Nutzung vorhandener Grundwasserleiter. Diese Methode ist generell sehr attraktiv, da sie zum einen weniger kostenintensiv ist und zum anderen die ganzjährige Wassertemperatur von in der Regel ca. 10-12°C effektiv genutzt werden kann. Der Grundwasserleiter bzw. das Wasservorkommen wird dabei direkt mit zwei Brunnen angebohrt und von dort zum Wärmeübertragungssystem der Straßentemperierung bzw. zu einer zwischengeschalteten Wärmepumpe gefördert.

Die Nutzung von Grundwasserleitern (Aquiferen) ist naturgemäß an deren Vorkommen gebunden. Eine Rücksprache mit einem Experten des Landesamts für Umwelt, Außenstelle Marktredwitz, ergab, dass vermutlich keine nutzbaren Wasservorkommen im Bereich der Wunsiedler Straße zu erwarten sind.

4.4 Mess-, Steuer- und Regelsystem

Neben den Komponenten zur Erdwärmegewinnung ist in jedem Fall eine intelligente und den Gegebenheiten angepasste Mess-, Steuer- und Regelungstechnik notwendig. Eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) muss Wetteränderungen über verschiedene Parameter wie Temperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit erkennen und den Heiz- bzw. Kühlkreis dementsprechend schalten.[13] Beim Einsatz von Wärmepumpen muss bei sinkenden

13 Dipl.-Ing K.-U. Mackert: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn (Bundesanstalt für Straßenwesen) 27.09.11 S. 13 Abrufbar unter http://www.bast.de

Temperaturen frühzeitig vor Erreichen der Schwelltemperatur von bspw. 3°C sichergestellt werden, dass genügend Wärme zur Verfügung steht. Für die Datenermittlung sind verschiedene Messsysteme notwendig. Bild 6 zeigt die Klimamessstation, wie sie bei der Belagstemperierung der Kanalbrücke in Berkenthin in Schleswig-Holstein zum Einsatz kommt. Dies ist das bisher erste und einzige Projekt dieser Art auf deutschem Boden. Es befindet sich gerade in der Erprobungsphase und wird im Winter 2011/2012 zum ersten Mal im Heizbetrieb arbeiten.

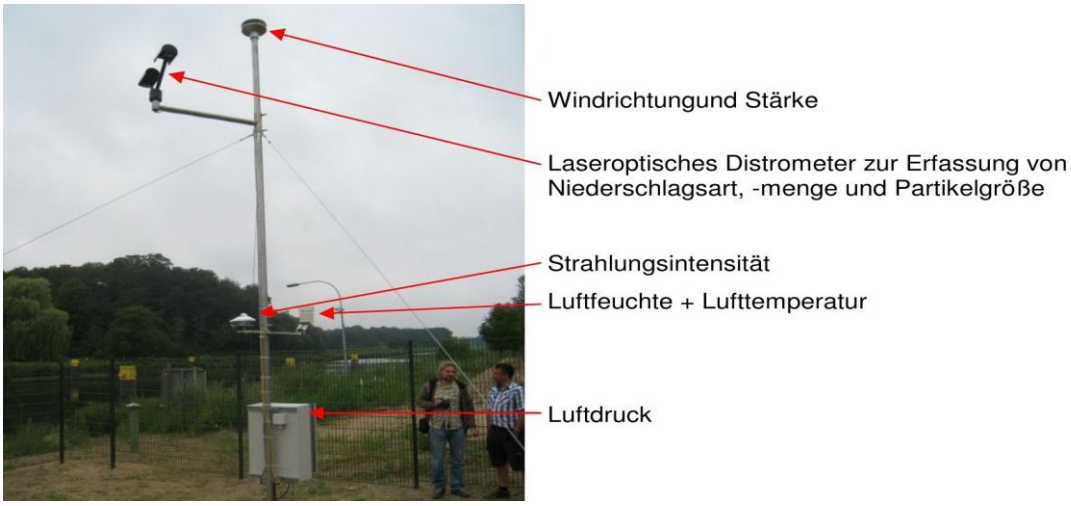


Abbildung 6: Klimamessstation Kanalbrücke Berkenthin

Darüber hinaus sind Temperaturmessungen im Belag notwendig. Im Winter muss sichergestellt werden, dass die Straße nur soweit aufgeheizt wird wie unbedingt nötig. Im Sommer wird ab einer gewissen Temperatur der Solekreislauf aktiviert, um die Kühlung des Asphalts zu gewährleisten.

Zu den nötigen Temperaturfühlern im Belag ist der Einsatz von Infrarot-Wärmemessgeräten (Strahlungspyranometern) anzuraten. Sie dienen zum einen der Redundanz beim Ausfall einzelner Temperaturfühler, zum anderen dem Datenabgleich.[14] Die Befestigung kann wie auf Bild 7 dargestellt an vorhandenen Straßenleuchten erfolgen. Darüber hinaus ist man so in der Lage, den Temperaturverlauf auf der Straßenfläche darzustellen, wodurch eine optimale Überwachung der Anlage gewährleistet wird.

14 Dipl.-Ing K.-U. Mackert: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn (Bundesanstalt für Straßenwesen) 27.09.11 S. 14 Abrufbar unter http://www.bast.de

Abbildung 7: Strahlungspyranometer

In der Regelung gibt es grundsätzliche Unterschiede zwischen einem Betrieb mit Wärmepumpe bzw. mit Erdwärmespeicher.

Wärmepumpe

Bei einem Betrieb mit Wärmepumpe muss die Kühlung im Sommer erst ab einer kritischen Belagstemperatur von ca 50°C betrieben werden. Diese Wärme sollte dann ins Erdreich geführt werden, um dort zur Regeneration der Tiefenbohrung beizutragen. So wird ein unnötiger Pumpenbetrieb vermieden.

Im Winterbetrieb muss die Regelung stets dafür sorgen, dass die Wärmepumpe die nötigen Vorlauftemperaturen erzeugt, je nach Außentemperatur muss die Wärmepumpe so mehr oder weniger leisten.

Erdwärmespeicher

Hier sollte ein Kühlbetrieb bereits wesentlich früher erfolgen. Primäres Ziel ist hierbei die effektive Speicherung von Wärme im Erdwärmespeicher. Letztlich kann man die Kühlung der Fahrbahnoberfläche und die damit verbundenen Vorteile als Nebeneffekt der Speicherung betrachten.

Beim SERSO Modell wird der Solekreislauf dann aktiviert, wenn die mittlere Belagstemperatur um 3K gegenüber der mittleren Temperatur im Felsspeicher ansteigt. So wird die Speichertemperatur im Sommer schrittweise angehoben, Wärmeverlusten durch „falsche" Kühlung wird vorgebeugt.

Im Winter muss die jeweils nötige Vorlauftemperatur zur Straßenheizung durch Mischen und Schalten der einzelnen Speicherregister erzeugt werden.

Bei einem Betrieb mit Erdwärmespeicher sind also zusätzlich noch Temperaturfühler notwendig, um die Soletemperatur im Speicher zu überprüfen.

4.5 Fazit der technischen Betrachtung

Zusammenfassend kann man festhalten, dass eine Straßentemperierung aufgrund der starken saisonalen Temperaturschwankungen im nahen Untergrund nicht mit Flächenkollektoren, sondern nur mit Erdwärmesonden sinnvoll ist. Ob man ein wärmepumpengestütztes System oder ein auf Erdwärmespeicher basierendes System bevorzugt, hängt in erster Linie von der Kostenbetrachtung ab. Die Erschließung eines Erdwärmespeichers erfordert viele Bohrungen und damit hohe Investitionskosten, während man beim Einsatz mit Wärmepumpen höhere Betriebskosten hat. Aus energetischer Sicht ist die erdwärmespeichergestützte Version vorzuziehen, da so lediglich die Energie für die Umwälzpumpen der Kreisläufe notwendig ist.

In jedem Fall ist die Regelung eines solchen Systems als aufwendig zu betrachten. Es müssen eine Reihe von Parametern überwacht und davon abhängig gehandelt werden. Mangelnde Praxiserfahrung erschwert eine korrekte Planung der Anlage sowie deren Regelung.

Die Lebensdauer der Komponenten ist relativ unkritisch, sie liegt bei Erdwärmesonden bei fachgerechter Ausführung bei ca. 100 Jahren.[15] Auch Wärmepumpen werden heute mit einer Laufleistung von 40.000 Betriebsstunden angegeben.[16] Beim Straßenaufbau geht die Studie SERSO+ von einer Lebensdauerverlängerung von 15-18 Jahren aus. Der Belag der SERSO Autobahn-Brückentemperierung in der Schweiz musste nach unseren Recherchen seit 1994 bis heute nicht erneuert werden.

5. Auslegung

5.1 Straßenbelag

Der Straßenaufbau muss auf die besonderen Anforderungen der Temperierung ausgelegt werden. Untersuchungen zum thermodynamischen Verhalten des Straßenaufbaus haben gezeigt, dass die Verlegung des Rohrsystems unterhalb des Belages zu hohen Verlusten führt.[17] Das Rohrsystem zur Wärmeübertragung wird deshalb in einer Zwischenschicht bestehend aus Gussasphalt eingebracht. Aufgrund der Verarbeitung im flüssigen Zustand wird so das ganze Rohr optimal umschlossen. Eine nachfolgende Verdichtung durch eine Straßenwalze ist nicht notwendig. Die darüberliegende Deckschicht wird als normaler

---

15 Bundesverband Wärmepumpe e.V.: Leitfaden Erdwärme.

http://www.waermepumpe.de/fileadmin/grafik/pdf/Flyer-Broschueren/Leitfaden-Erdwaerme_BWP.pdf Abgerufen am 13.12.11

16 Dimplex: Welche Lebensdauer haben Wärmepumpen. 05.12.2006. http://www.dimplex.de/faq/pdf/40.pdf Abgerufen am 13.12.11

17 Dipl.-Ing. M. Eilers: Glättevermeidung durch die Nutzung von Geothermie (Bundesanstalt für Straßenwesen) 22.10.2008 S.3 Abrufbar unter http://www.bast.de abgerufen am 13.12.11

Asphaltbeton in Heißbauweise aufgetragen. Auch hier begünstigt das geringe Hohlraumvolumen dieser Schicht von unter 5,5 Vol % den Wärmetransport an die Straßenoberfläche.

Als Wärmeträgerrohrsysteme haben sich ummantelte Kunststoffrohre aus PE-Xa bewährt. Infrage kommende Rohrsysteme werden von der Firma Velta, Markenname Uponor, oder von der Firma REHAU AG+Co angeboten, wobei das REHAU Rohrsystem auch für den Einbau in Asphalt geeignet ist. Das RAUWAY Rohr-System der Firma REHAU besteht aus PE-HD und PE-Xa/PE-HD Material. Es zeichnet sich durch seine Widerstandsfähigkeit auch gegenüber starker Hitzeeinwirkung bei der Asphaltaufbringung aus (getestet bis 240°C).[18] Die Komponenten wurden in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen sowie der Universität der Bundeswehr München direkt auf ihren Einsatz zur Beheizung/Kühlung von Straßenbelägen hin entwickelt und getestet.

Das RAUWAY System stellt eine preislich attraktive, korrosionsfreie, Straßenfräsen-geeignete und recycelbare Lösung dar. Alternative Rohrsysteme aus Stahl- bzw. Kupferrohr sind deshalb eher nicht zu empfehlen.

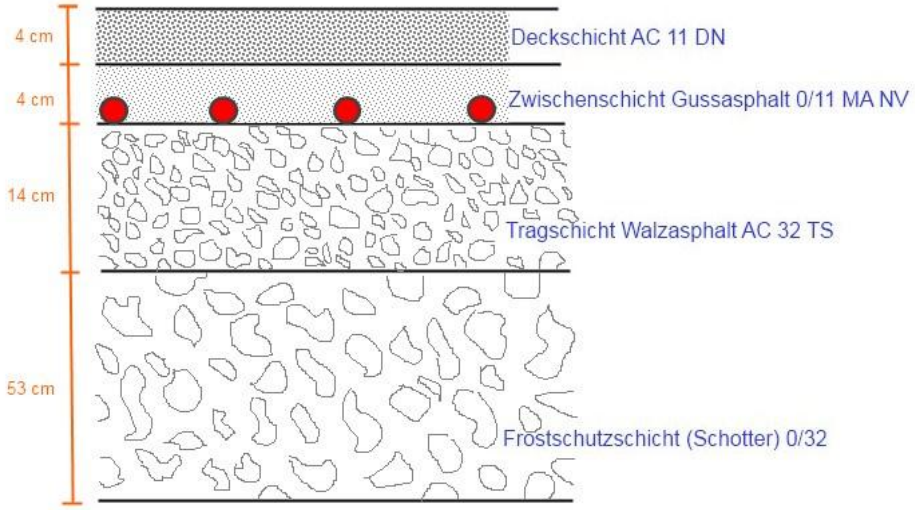


Abbildung 8: Straßenaufbau

Der Verlegeabstand der Rohre sollte 10cm betragen. Bei verschiedenen Versuchen hat ein größerer Abstand der Rohre zueinander nicht den gewünschten Erfolg bringen können. Bei Abständen zwischen 15-20cm ist die Temperaturspreizung auf der Fahrbahnoberfläche so hoch, dass sich unter Umständen zeitweise vereiste Streifen bilden könnten.[19]

Ein Verlegeabstand von 10cm hat eine Rohrlänge pro Quadratmeter von rund 10m zu Folge. Somit ergibt sich für das betrachtete 135m lange Teilstück eine benötigte Rohrlänge von etwa 6750m.

---

18 Dipl.-Ing. M. Eilers: Glättevermeidung durch die Nutzung von Geothermie (Bundesanstalt für Straßenwesen) 22.10.2008 S.4 Abrufbar unter http://www.bast.de abgerufen am 13.12.11

19 Dipl.-Ing. M. Eilers: Glättevermeidung durch die Nutzung von Geothermie (Bundesanstalt für Straßenwesen) 22.10.2008 S.3 Abrufbar unter http://www.bast.de

Erste Erkenntnisse beim Bau der Straßentemperierung in Berkenthin ergaben zudem: „Die Anordnung des Registers sollte grundsätzlich in Fahrbahnlängsrichtung erfolgen, da eine Scheiteldruckbelastung der Rohre durch das rollende Rad günstiger ist als Einwirkungen quer zur Rohrachse. Außerdem ist durch die Aufteilung der Hauptkreise auf die Fahrstreifen im Schadensfall eine Behelfsverkehrsführung möglich. Die Deckschicht kann wahlweise in Guss- oder Walzasphalt ausgeführt werden. Gussasphalt besitzt die größte Wärmeleitfähigkeit aller bituminösen Bauweisen und erfordert keine mechanische Verdichtung."[20] Jedoch sind die Kosten für einen Quadratmeter Gussasphalt mit über 30€ wesentlich höher als für Walzasphalt (ca. 10€/m²).[21]

5.2 Betrachtung des Wärmebedarfs

Der Wärmebedarf für eine Straßentemperierung kann nur grob abgeschätzt werden. Er hängt neben der Außentemperatur von weiteren Faktoren wie Windgeschwindigkeit oder Niederschlag ab. Je höher zum Beispiel im Winter die Windgeschwindigkeit, desto höher sind auch die konvektiven Verluste. Weiterhin wird je nach Schneefall eine gewisse Energie zum Schmelzen des Schnees benötigt. Für eine komplette Schneefreihaltung der Freifläche sind in Deutschland etwa 250-300 W/m² anzusetzen. Systeme zur reinen Eisfreihaltung kommen mit etwa der Hälfte bis einem Drittel des Wärmestroms aus.[22] Welche Zielsetzung man beim Marktredwitzer Projekt zugrunde legt, ist letztlich vor allem eine ökonomische Frage. Für die folgenden Berechnungen wurden 300 W/m² angenommen.

Legt man besonderen Wert auf ein sehr flexibles Heizsystem, das auch auf große Temperaturabfälle in kurzer Zeit reagieren kann, ist der Einsatz von Wärmepumpen zum Bereitstellen hoher Vorlauftemperaturen erforderlich. Andernfalls muss der Heizbeginn wegen der Trägheit des Systems noch frühzeitiger und vorausschauender geplant werden.

5.3 Geothermie mit Wärmepumpe

Um der Straße die nötige Wärme mittels Geothermie bereitzustellen, müssen Wärmepumpe und Erdwärmequellen richtig ausgelegt werden. In einer korrekten Auslegung spielen vor allem die örtlichen Gegebenheiten, also die Beschaffenheit des Untergrundes, eine Rolle.

---

20 Dipl.-Ing K.-U. Mackert: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn (Bundesanstalt für Straßenwesen)27.09.11 S. 15 Abrufbar unter http://www.bast.de

21 Telefonische Auskunft der Fa. Heitkamp & Hülscher GmbH & Co. KG - www.asphaltrechner.de

22 Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung NRW: GeoVerSi Studie. 16.06.05 S102 Abrufbar unter: http://www.geoversi.nrw.de/

Um eine Wärmestromdichte von ca. 300 W/m² bereitzustellen, ist eine Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 125 kW_{th} notwendig. Aufgrund der niedrigeren Betriebszeiten (ca 300h) als beispielsweise bei der Beheizung von Wohngebäuden und den daraus resultierenden erhöhten Sonden-Entzugsleistungen, kann mit einer Arbeitszahl von 4,3 gerechnet werden. Dies bedeutet, dass aus einer Kilowattstunde elektrischer Energie mit Hilfe der Erdwärme 4,3 Kilowattstunden thermische Energie gewonnen werden. Daraus ergibt sich eine nötige Gesamtentzugsleistung von 96kW, die dem Erdreich entnommen werden müsste.

Bei einer Entzugsleistung von 50 Watt pro Meter Bohrtiefe ergibt sich eine benötigte Gesamtlänge von 1920m. Mit der gewöhnlich üblichen Sondenlänge bis maximal 100m Tiefe kommt man also auf rund 20 Bohrungen. Da die geologischen Verhältnisse vor Ort möglichweise eine bessere Wärmeentzugsleistung bieten (geschätzt 60-70W/m), könnten in der Praxis auch weniger als 20 Bohrungen notwendig sein. Zusätzliche kostendämpfende Wirkung könnten Bohrungen jenseits der 100m Tiefe ergeben, weil sich dadurch die Anzahl der Bohrungen verringert.

Um die geothermischen Komponenten eines Projektes dieser Dimension korrekt auslegen zu können, müssen in jedem Fall Voruntersuchungen mittels einer Pilotbohrung durchgeführt werden. Zu den Untersuchungen gehört der Thermal-Response-Test zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit, der Untergrundtemperatur und des Bohrlochwiderstandes.[23]

6. Kosten

Auf Basis des Szenarios unter Einsatz einer Wärmepumpe wurde von der Energieagentur Nordbayern eine exemplarische Auslegung erarbeitet. Zum Vergleich wurde eine weitere Auslegung durch die Firma REHAU AG+Co vorgenommen. Obgleich zu Auslegung und Materialeinsatz im Vorfeld Berechnungen stattfanden, können die hier aufgeführten Kosten lediglich eine grobe Richtung vorgeben. Sie ersetzen keine detaillierte Kostenrechnung im Planungsfall.

Die rechnerische Auslegung und die damit verbundenen Kosten beziehen sich auf einen 100m langen Straßenabschnitt mit 5m Breite, also einer Fläche von 500m². Für ein 675m² großes Flächenstück, was der im Kapitel I ermittelten Länge von 135m entspricht, können die Ergebnisse entsprechend hochgerechnet werden.

Bei der Kostenaufstellung der Firma REHAU handelt es sich um Listenpreise.

23 Bundesverband Wärmepumpe e.V.: Leitfaden Erdwärme.
http://www.waermepumpe.de/fileadmin/grafik/pdf/Flyer-Broschueren/Leitfaden-Erdwaerme_BWP.pdf Abgerufen am 13.12.11

6.1 Investitionen

Kosten für den Straßenaufbau

Die Gesamteinbaukosten pro Quadratmeter für den nachträglichen Einbau werden mit 50,00€ veranschlagt, wobei 5,00€/m² für die Einbaukosten der Rohre bereits enthalten sind. Der Preis bezieht sich auf das Abfräsen bestehender Asphaltsichten und das Aufbringen einer Zwischensicht aus Gussasphalt sowie einer Deckschicht aus Walzasphalt.

Temperierte Fläche	Preis pro m²	Gesamtpreis (Brutto)
500m²	50,00 Euro	25.000,00 Euro

Tabelle 2: Kosten - Straßenaufbau

Kosten für die Peripherie

Unter Einbeziehung der Ergebnisse aus Kapitel 5 kann bei 55 Euro pro Bohrmeter von einem Nettopreis von 105.600 € für die Erdarbeiten ausgegangen werden.

Position	Kosten
Wärmepumpe 125kW$_{th}$ / 30kW$_{el}$	30.000 Euro
Gebäude für Wärmepumpe, Pumpen etc.	12.000 Euro
Anlagentechnik, Verrohrung, isolierte Transportleitung	45.500 Euro
Rohrregistersystem + Verbindung	42.000 Euro
Erschließung Wärmequelle (Bohrung etc.)	105.600 Euro
Gesamtpreis (Netto)	235.100 Euro
Gesamtpreis (Brutto)	279.769 Euro

Tabelle 3: Aufstellung Peripheriekosten EAN

Es ergibt sich ein Gesamtbruttopreis von 279.769 €, wobei die Kostenkalkulation für das Rohrregistersystem zur Flächentemperierung auf den Angaben der Firma REHAU beruht. Hierfür wird seitens REHAU 84€/m², also insgesamt 42.000 Euro kalkuliert.

Für Sonde und Wärmepumpe veranschlagt REHAU 390 €/m². Der seitens REHAU ermittelte Gesamtbruttopreis von 275.000 Euro ergibt sich aus dem genannten Quadratmeterpreis für Sonde und Wärmepumpe plus 160€/m² für alle Rohre plus Verbindungstechnik, also 550€/m².

Mess-, Steuer- und Regelsystem MSR

Zu den Investitionskosten für die Steuerungs- und Regelungstechnik liegen uns leider keine Zahlen vor. Selbst eine grobe Abschätzung ist schwierig, jedoch kann man sich bei der Planung am Brückenenteisungsprojekt Berkenthin in Schleswig-Holstein orientieren. Hierbei wurden für Sensorik, Schaltschrank und Fernüberwachung rund 100.000€ ausgegeben. Allerdings dürfte hauptsächlich der Pilotcharakter des Projektes für diese hohe Summe verantwortlich sein. So wurde hier sicher mehr Sensorik als zwingend notwendig verbaut, um

das Verhalten der Brücke während der Temperierung weiter zu erforschen. Für eine Mindestkonfiguration, wie sie für die Wunsiedler Straße benötigt werden würde, könnte man in etwa von der Hälfte dieser Kosten, also von einer Investitionssumme von **rund 50.000€** ausgehen. Eine Kalkulation mit MSR befindet sich im Anhang.[24]

Investitionskosten gesamt ohne MSR

Art	Kosten EAN	Kosten REHAU
Straßenaufbau	34.350 Euro	34.350 Euro
Peripherie	279.769 Euro	275.000 Euro
Gesamtkosten (Brutto)	314.119 Euro	309.350 Euro

Tabelle 4: Investitionskostenvergleich EAN, REHAU

Die Kostenabschätzung der Firma REHAU entspricht also in etwa den von der Energieagentur Nordbayern ermittelten Werten, wobei das MSR nicht in dieser Betrachtung auftritt, da seitens REHAU keine konkreten Zahlen vorlagen.

6.2 Betriebskosten

Größter Faktor für die Betriebskosten sind die Stromkosten. Für die Wärmegewinnung hat die REHAU AG+Co in Erlangen zwei Szenarien basierend auf geothermischen Erdwärmesonden durchgerechnet, auf die wir uns hier im Wesentlichen beziehen.

Szenario 1

Dieses Szenario geht vom Einsatz einer Wärmepumpe mit 125kW Heizleistung und 30kW Stromaufnahme aus. Für den Heizkreis wird eine Laufzeit von 300h (30 Tage à 10h) veranschlagt. Der benötigte Energiebedarf liegt bei 9.000kWh/a für die Wärmepumpe und 1.645kWh/a für die Pumpentechnik (ca. 5,5 kW mittlere Pumpenleistung).

Stromkosten 1. Jahr: 1.703,20€ (Strompreis 16ct/kWh)

Anmerkung: Für die Temperierung der Fahrbahn im Sommer sollten hier weitere 300h (30 Tage à 10h) reine Pumpenlaufzeit (ohne Wärmepumpe) angenommen werden. Hierdurch erhöhen sich die Stromkosten auf insgesamt **1.966,40€/a**.

[24] Gespräch mit Dipl.-Ing. Klaus-Ulrich Mackert, Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein, Lübeck, vom Januar 2012

Szenario 2

Hierbei wird der Boden als saisonaler Erdwärmespeicher verwendet, auf den Einsatz einer Wärmepumpe wird verzichtet. Die längeren Betriebszeiten, verursacht durch das Laden des Erdwärmespeichers im Sommer, belaufen sich auf geschätze 900h (90 Tage a 10h). So ergibt sich eine Gesamtbetriebszeit von 1.200h. Dies entspricht einem Energiebedarf von 6.580 kWh/a

Stromkosten 1. Jahr: 1.052,80€ (Strompreis 16ct/kWh)

Dabei sind die Stromkosten natürlich stark temperaturabhängig, wichtigster Parameter hierbei ist die Außentemperatur im Winter.

Weitere Betriebskosten ergeben sich aufgrund von Wartungskosten. Die Anlage sollte regelmäßig, nach jeder Saison, von Fachpersonal auf Schäden überprüft werden. Die Soleflüssigkeit muss in der Regel nicht getauscht werden, da die moderaten Betriebstemperaturen die Flüssigkeit kaum altern oder flocken lassen – im Gegensatz zu solarthermischen Anlagen. Dennoch sollte auch das Wärmeträgermedium regelmäßig kontrolliert werden. Bei Einsatz von Wärmepumpen müssen diese ebenfalls in den vom Hersteller vorgeschrieben/empfohlenen Intervallen gewartet werden. In der Regel kann diese Überprüfung mit der jährlichen Anlagenkontrolle kombiniert werden. Hierbei sind wir bei Variante 1 von jährlichen Wartungskosten von 1.500€ ausgegangen, bei der technisch weniger aufwendigen Variante 2 von rund 800€ pro Jahr. Angenommen wurde ein jährlicher Anstieg um 2 Prozent.

6.3 Gegenüberstellung: Erdwärmespeicher, Wärmepumpe

Folgendes Szenario vergleicht die Betriebskosten einer wärmepumpengestützen Straßentemperierung mit einer Temperierung auf Basis eines Erdwärmespeichers ohne Wärmepumpe. Für die Betriebskosten gelten die unter 6.2 aufgezeigten Ausgangswerte.

Während der Jahre 2000 bis 2009 hat sich der Haushaltsstrompreis von 13,9ct/kWh auf 23,2ct/kWh erhöht, daraus ergibt sich eine mittlere Preissteigerung von 7,44% pro Jahr.[25]

Größere Kommunen haben in der Regel gesonderte Hoch- und Niederstromtarife. Bei dieser Rechnung wurde mit einem gemittelten Strompreis von 16,00ct/kWh für das Ausgangsjahr 2011 gerechnet. Es wird zusätzlich nur mit einer Preissteigerung von 5% gerechnet, obgleich

25 BDEW, Stand April 2009 abrufbar unter http://www.bee-ev.de/_medien/presse/2009/0904_AEE_Haushaltsstrompreis_Entwicklung2000-2009_web.jpg

eine höhere Strompreissteigerung auch im kommunalen Sektor durchaus realistisch sein kann.

Jahr	Betriebskosten VAR 1 mit Wärmepumpe	Betriebskosten VAR 2 ohne Wärmepumpe	Kostenvorteil summiert
1	3.466,40 €	1.852,80 €	1.613,60 €
2	3.594,72 €	1.921,44 €	3.286,88 €
3	3.728,56 €	1.993,03 €	5.022,40 €
4	3.868,17 €	2.067,71 €	6.822,86 €
5	4.013,82 €	2.145,63 €	8.691,04 €
6	4.165,80 €	2.226,93 €	10.629,91 €
7	4.324,41 €	2.311,78 €	12.642,54 €
8	4.489,95 €	2.400,34 €	14.732,14 €
9	4.662,76 €	2.492,79 €	16.902,11 €
10	4.843,17 €	2.589,31 €	19.155,97 €
11	5.031,55 €	2.690,10 €	21.497,42 €
12	5.228,27 €	2.795,34 €	23.930,35 €
13	5.433,73 €	2.905,27 €	26.458,81 €
14	5.648,35 €	3.020,10 €	29.087,07 €
15	5.872,56 €	3.140,05 €	31.819,57 €
16	6.106,81 €	3.265,39 €	34.660,98 €
17	6.351,58 €	3.396,36 €	37.616,21 €
18	6.607,39 €	3.533,23 €	40.690,37 €
19	6.874,75 €	3.676,29 €	43.888,83 €
20	7.154,21 €	3.825,82 €	47.217,21 €
21	7.446,37 €	3.982,15 €	50.681,43 €
22	7.751,82 €	4.145,59 €	54.287,65 €
23	8.071,20 €	4.316,50 €	58.042,36 €
24	8.405,19 €	4.495,22 €	61.952,33 €
25	8.754,49 €	4.682,14 €	66.024,69 €
26	9.119,84 €	4.877,64 €	70.266,89 €
27	9.502,00 €	5.082,15 €	74.686,74 €
28	9.901,80 €	5.296,09 €	79.292,45 €
29	10.320,08 €	5.519,93 €	84.092,59 €
30	10.757,74 €	5.754,14 €	89.096,19 €

Tabelle 5: Betriebskostenvergleich

Für ***Variante 2***, das System ohne Wärmepumpe, ergibt sich für einen Zeitraum von 20 Jahren also ein **Betriebskostenvorteil von ca. 47.000 €.**

Demgegenüber stehen erhöhte Investitionskosten bei der Erschließung eines Erdwärmespeichers. Da sich der Aufwand und damit die Kosten ohne genaue Untergrundanalyse nur sehr schwierig darstellen lassen, können hier bestenfalls Schätzungen angestellt werden. Aufgrund der Auswertung anderer Projekte der Studie GeoVerSi kann man mit ca. 3.500 Bohrmetern rechnen. Das sind 15 Bohrungen mehr als im Auslegungsfall mit Wärmepumpe. Andererseits entfallen die Kosten für die Wärmepumpe selbst. Somit **erhöhen sich die Investitionskosten im Vergleich zur Variante 1 um insgesamt rund 52.500€** (zusätzliche Bohrungen: 82.500€, abzüglich nicht benötigte Wärmepumpe in

Höhe von 30.000€). Bei einer Finanzierung über 20 Jahre zu einem Zinssatz von 3,0% (z.B. KfW-Kommunalkredit) ergibt sich während der Finanzierung ein Jahresgesamtkosten-unterschied von rund 3.540€ zu Gunsten der Variante 1, über die Laufzeit von 20 Jahren resultiert daraus ein Mehraufwand von rund 70.800€.

→ Siehe Anhang 1: Jahresgesamtkostenvergleich

Im Finanzierungszeitraum können die Mehrausgaben für die Erschließung eines Erdwärmespeichers noch nicht durch die niedrigeren Betriebskosten ausgeglichen werden. Erst **nach ca. 27 Betriebsjahren ist Version 2 auch wirtschaftlich im Vorteil**, dann jedoch dauerhaft.

→ Siehe Anhang 2: Diagramme Kostenkalkulation

7. Kostendämpfende Aspekte

7.1 Erhöhung der Verkehrssicherheit

Der wichtigste Vorteil, den eine eisfreie Straße mit sich bringt, ist natürlich der Aspekt einer sicheren und allzeit befahrbaren Straße. Aus volkswirtschaftlicher Sicht spielen daraus resultierende geringere Unfallzahlen durchaus eine Rolle. Allerdings sind sie auf dem kurzen Teilstück nicht quantifizierbar.

7.2 Entlastung des Winterdienstes

Gerade steile Verkehrswege wie der gewählte Abschnitt der Wunsiedler Straße müssen im Winter vermehrt gestreut werden. Intensive Streueinsätze könnten durch eine Straßentemperierung besonders an dem betrachteten Teilstück mit 11% Steigung vermindert werden, oder im Falle einer Auslegung auf Schneeschmelze sogar ganz entfallen.

Die für den Winterdienst zuständige etwa 40 Mann starke Belegschaft in Marktredwitz würde sich dadurch jedoch nicht reduzieren. Allein in Marktredwitz werden gegenwärtig etwa 200km Straße vom Winterdienst betreut.[26] Eine 100-135m lange Strecke fällt hierbei nicht ins Gewicht. Dennoch ist es wichtig, Streumaterialien wie Salz oder Split langfristig zu reduzieren.

---

26 Herbert Scharf: Vier Räumfahrzeuge stehen in der Werkstatt. Frankenpost 09.12.2010

Abrufbar unter: http://www.frankenpost.de/lokal/fichtelgebirge/marktredwitz/Vier-Raeumfahrzeuge-stehen-in-der-Werkstatt;art2442,1392537

Das Bayerische Landesamt für Umwelt schreibt hierzu:[27]

> „Auftausalze schädigen Boden, Bäume und Sträucher, die Pfoten von Haustieren, aber auch Fische und Fischnährtiere in Gewässern. Außerdem lassen die Salze Brücken und Fahrzeuge korrodieren. Durch all diese Faktoren entstehen Folgekosten für Neuanpflanzungen, Reparaturen und Sanierungen.
>
> Auftausalze können mit dem Sickerwasser in das Grundwasser gelangen und so zu einer „Aufsalzung" des Grundwassers beitragen.
>
> Um abstumpfende Streumittel wie Splitt herzustellen, auszubringen, einzusammeln und zu entsorgen, wird viel Energie benötigt. Die Wiederverwendung der Streumittel ist nur nach aufwändiger Nassreinigung möglich, da sie erhebliche Mengen Reifenabrieb, Staub und anderen Straßenschmutz enthalten.
>
> Abstumpfende Stoffe können nach Winterende nur teilweise wieder entfernt werden. Das liegengebliebene Material verunreinigt Grünflächen und landwirtschaftliche Flächen. Auch in den Sinkkästen der Straßenabläufe und dem Sandfang kommunaler Kläranlagen sammeln sich große Mengen, die entsorgt werden müssen. Bei den Arbeiten mit den abstumpfenden Stoffen kann der sich entwickelnde Staub die Gesundheit des Kehrpersonals gefährden."

Letztlich müssen all diese Folgekosten zum Großteil von der Kommune selbst getragen werden!

Vom Bauamt der Stadt Marktredwitz wurde uns mitgeteilt, dass im vergangen Winter ca. 80 Streueinsätze gefahren werden mussten. Der Salzaufwand für eine steile Straße, wie die Wunsiedler Straße liegt bei ca. 30g/m². Da nicht die gesamte Straßenbreite gestreut wird, sondern nur ca. 4m, verringert sich die Fläche auf 540m². Es ergibt sich daraus ein **Salzeinsatz von knapp 1,3t** pro Jahr.

Durch die Steigung der Wunsiedler Straße ist vorzeitiger Streueinsatz nötig, der die Befahrbarkeit auch bei fallenden Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts sicher stellt. Solche Einsätze könnten durch eine intelligente Straßentemperierung vermieden werden!

Im Regelfall zahlt man für eine Tonne Salz derzeit ca. 120€. Im der vergangenen Saison 2010/2011 stieg der Salzpreis aufgrund des harten Winters und des damit verbundenen deutschlandweiten Mangels sogar auf 250€/t an.[28]

---

27 Susanne Weichwald, Dr. Katharina Stroh: Streusalz und Splitt im differenzierten Winterdienst. By. Landesamt für Umwelt. Februar 2010. Abrufbar unter: http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_63_streusalz_splitt_winterdienst.pdf

28 Salzpreis explodiert. Echo Online 28.12.2010 Abrufbar unter http://www.echo-online.de/region/gross-gerau/raunheim/Raunheim-Salzpreis-explodiert;art1258,1470026

Das direkte Einsparpotential für Salzkosten durch die Straßentemperierung beträgt im Regelfall also lediglich ca. 150 Euro pro Jahr und ist somit wohl zu vernachlässigen.

Selbst wenn keine vollständige Schneeschmelzung, sondern nur eine Eisfreihaltung umgesetzt wird, könnte man im betreffenden Abschnitt in etwa die Hälfte des Winterdienstes einsparen.[29] Finanziell würde sich dies jedoch nur niederschlagen, wenn ein längerer Streckenabschnitt oder ein ganzer Straßenzug temperiert würde.

7.3 Lebensdauer der Straße

Durch eine Temperierung der Straßenoberfläche werden extreme Belagstemperaturen vermieden. Vor allem durch hohe Temperaturen im Sommer bildet der Asphalt aufgrund seiner thermoplastischen Eigenschaft unter Belastung Spurrillen aus. Es handelt sich hierbei letztlich um eine nachträgliche Verdichtung aufgrund lokaler Beanspruchung. Diese Spurrillen sorgen für eine nicht unerhebliche Aquaplaning-Gefahr. Dieser Effekt gilt jedoch nur bedingt für die Wunsiedler Straße, da durch die Steigung das Wasser in den Spurrillen abfließen kann.

Abbildung 9: Spurrillen

Ein regelmäßiges Erneuern der Deckschicht gewöhnlicher Asphaltsraßen ist unumgänglich. Zur Lebensdauer einer Straße können allerdings nur schwierig Aussagen getroffen werden, da sie von vielen Faktoren beeinflusst wird. Neben den Temperaturen spielen die Asphaltqualität sowie die Beanspruchung die größte Rolle. Die Lebensdauer einer Deckschicht mit Belastungen, wie sie auf die Wunsiedler Straße zutreffen, reicht von sechs bis ca. 20 Jahre. Für die Schweizer SERSO-Plus Studie (Temperierung eines Autobahnabschnitts) wurde mit einer Verlängerung der Lebensdauer des Deckbelags um 15-18 Jahren gerechnet. Man könnte also pauschal davon ausgehen, dass man sich mindestens jede zweite Deckschichtsanierung sparen kann.

Nach Rücksprache mit dem Staatlichen Bauamt Bayreuth liegen die Kosten für die Sanierung einer Asphaltdeckschicht bei ca. 25-30€/m². Die Minderbelastung für die Erneuerung einer Deckschicht des betrachteten Straßenabschnitts (675m²) liegt daher bei 16.875€ bis 20.250€.

29 Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung NRW: GeoVerSi Studie. 16.06.05 S.88
Abrufbar unter: http://www.geoversi.nrw.de/ abgerufen am 23.11.11

Leider darf in der Praxis jedoch nicht grundsätzlich von einer längeren Asphaltlebensdauer ausgegangen werden. Laut Aussage der Autobahnmeisterei Spiez (CH), welche seit Inbetriebnahme im Jahr 1994 Betreiber der Brückentemperierung SERSO ist, mussten bereits einmal Ausbesserungsarbeiten auf Grund von Spurrillenbildung vorgenommen werden. Eine komplette Erneuerung der Deckschicht oberhalb des Heizregisters ist bereits in Planung.[30]

[30] Gespräch mit der Straßenmeisterei Spiez (CH) vom Jan 2012

8. Zusammenfassung

Die geothermische Temperierung eines Straßenabschnitts hat in Deutschland noch immer Pilotcharakter. Die Umsetzung eines solchen Vorhabens in der Stadt Marktredwitz, hier untersucht anhand eines rund 100 Meter langen Teilstücks der Wunsiedler Straße, wäre ein wertvoller Baustein, um für zuständige Behörden, Kommunen und Fachfirmen dringend notwendige weitere Erkenntnisse zu erhalten.

Üblicherweise wird eine Belagstemperierung bei exponierten Abschnitten wie Brücken angewandt. Freistehende Bauwerke kühlen bei niedrigen Temperaturen wesentlich schneller aus als die angrenzenden Straßen, weshalb die Glatteisbildung dort in der Regel auch höhere Risiken für Verkehrsteilnehmer mit sich bringt. Der betreffende Abschnitt der Wunsiedler Straße ist mit seinem verhältnismäßig starken Gefälle jedoch bei winterlichen Straßenverhältnissen zweifellos ein Gefahrenpunkt, dessen Entschärfung eine Temperierung rechtfertigt.

Im internationalen Vergleich wird das Thema in Deutschland fast etwas stiefmütterlich behandelt. Während im europäischen Ausland durchaus seit Jahren, teils Jahrzehnten, Projekte umgesetzt wurden, suchte man vergleichbare Anlagen im Bundesgebiet bislang vergebens. Erst 2011 wurde mit einer Brückenbeheizung im schleswig-holsteinischen Berkenthin ein Modellvorhaben realisiert, bei dem ebenfalls Geothermie zum Einsatz kommt. Jedoch sind die Voraussetzungen bei einem Brückenbauwerk mit der Temperierung eines „normalen" innerörtlichen Streckenabschnitts kaum zu vergleichen. Zudem werden erste belastbare Ergebnisse aus Berkenthin wohl erst im Laufe der nächsten Jahre vorliegen.

Daher steckt in der Umsetzung eines solchen Projekts für die Stadt Marktredwitz auch die Chance, in diesem Bereich als Vorreiter wahrgenommen zu werden.

Die vorliegende Studie kommt zu dem Schluss, dass eine Straßentemperierung im vorgesehenen Abschnitt der Wunsiedler Straße nicht nur grundsätzlich realisierbar, sondern durch die Nutzung von Erdwärme auch wirtschaftlich darstellbar ist.

Als mögliches Gesamtkonzept erscheint der Betrieb über eine Wärmepumpe wegen der niedrigeren Investitionskosten zunächst als kostengünstigere Variante. Die Mehrkosten für die Erschließung eines saisonalen Erdwärmespeichers rechnen sich aufgrund der zusätzlichen Bohrungen voraussichtlich erst nach 26 bis 27 Jahren Betriebszeit.

Allerdings muss in diesem Zusammenhang auf eine Reihe von Unwägbarkeiten hingewiesen werden, die im Rahmen dieser Studie nicht vollends geklärt werden können. So wurde bei der Berechnung der Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonden von einem Wert von 50 Watt pro Meter ausgegangen. Sollte die Entzugsleistung aufgrund der geologischen Gegebenheiten höher sein, würden sich bei einem saisonalen Wärmespeicher deutlich schneller Kostenvorteile ergeben. Ebenso könnte sich eine Überschreitung der üblichen Bohrtiefe von 100 Metern positiv auf die Wirtschaftlichkeit dieser Variante auswirken. Einen

genauen Aufschluss hierüber kann aber erst eine Probebohrung geben, die vor einer weiteren Planung ohnehin dringend anzuraten ist.

Ebenso wäre ein Erdwärmespeicher deutlich schneller im Vorteil, wenn das System nicht auf eine komplette Schneeschmelze, sondern lediglich auf Eisfreihaltung ausgelegt würde. Hierdurch könnten die Investitionskosten auch insgesamt deutlich reduziert werden, da überschlägig nur die Hälfte der Bohrungen nötig wären.

Die Schmelzwasser-Problematik sollte in jedem Falle beachtet werden. Auch durch eine reine Eisfreihaltung entsteht in dem betreffenden Abschnitt vor allem bei Schneefall und Außentemperaturen um den Gefrierpunkt Schmelzwasser. Bei der Umsetzung ist sicherzustellen, dass dieses Wasser nicht für erhöhte Eisbildung im unteren Bereich des Hangabschnitts sorgt.

Vom reduzierten Salz- und Spliteinsatz profitiert natürlich die Umwelt. Die wirtschaftlichen Vorteile sind im Vergleich zur Gesamtinvestition aber eher gering. Aufgezeigte Einsparungen wie der verringerte Salzeinsatz fallen mit 150€ pro Jahr kaum ins Gewicht, auch kann der reduzierte Winterdienst auf einem nur 100 Meter langen Teilstück nicht kostenmäßig dargestellt werden.

Deutlich stärker finanziell niederschlagen dürfte sich die erhöhte Lebensdauer der Deckschicht. Man geht davon aus, dass durch die Temperierung der Straße im Sommer die Stabilität verbessert und der Sanierungsaufwand reduziert werden kann. Diese Einsparungen zu beziffern ist allerdings schwierig, da hierüber noch zu wenig verlässliche Erkenntnisse vorliegen. Zudem haben zum Beispiel die Erfahrungen der Brückentemperierung beim Projekt SERSO in der Schweiz gezeigt, dass auch eine temperierte Straße bei hohen Temperaturen und starker Belastung nicht völlig immun gegen Spurrillenbildung ist.

Wichtigstes Argument für den Einsatz einer Temperierung ist und bleibt deshalb die Erhöhung der Verkehrssicherheit. Der betrachtete Abschnitt gilt mit seinen 11 Prozent Steigung auch beim Winterdienst der Stadt Marktredwitz als kritisch. Mit einer Temperierung gelänge es, diesen Abschnitt weitgehend eisfrei zu halten, was eindeutig der Verkehrssicherheit in diesem Bereich dienen würde.

Aufgrund des Pilotcharakters ist eine enge wissenschaftliche Begleitung des Projekts wünschenswert. Dies würde auch die Bemühungen der Stadt unterstützen, einen Lehrstuhl für Geothermie in Marktredwitz anzusiedeln. Ebenfalls eingebunden sein sollte die Dienststelle Marktredwitz des Landesamts für Umwelt mit ihren Experten für Geologie. Bemerkenswert ist zudem das Interesse der Wirtschaft (nicht nur aus der Region), an diesem möglichen Vorzeigeprojekt beteiligt zu sein.

Das Vorhaben in Berkenthin wurde mit hohem Aufwand gefördert und genoss schon in der Planungs- und Bauphase hohes mediales Interesse. Wenn ein ähnliches Projekt in Marktredwitz umgesetzt werden soll, dann muss auch hier der Pilotcharakter einer solchen Temperierung hervorgehoben werden. Die im Vergleich zu einer herkömmlichen Straßenbaumaßnahme verhältnismäßig hohen Investitionskosten könnten dann zu einem guten Teil über entsprechende Fördermittel von Bund und Freistaat dargestellt werden. Grundsätzlich dürfte bei den zuständigen Straßenbaubehörden, aber auch im Bayerischen

Innen-, Wirtschafts- und Umweltministerium sowie im Bundesverkehrsministerium großes Interesse an der Umsetzung eines solchen Pilotprojektes vorhanden sein. Eine Kontaktaufnahme zu möglichen Fördergebern ist daher unbedingt anzuraten.

9. _Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Straßenverlauf, Teilstrecke.

http://www.geodaten.bayern.de/BayernViewer2.0/index.cgi abgerufen am 21.11.11 (Bearbeitet)

Bild 2: Winterdienst in Marktredwitz – Facebook Profil

http://de-de.facebook.com/pages/Winterdienst-in-Marktredwitz/165173696851062 abgerufen am 28.11.11

Bild 3: Funktionsweise einer Wärmepumpe

http://www.energiesparen-im-haushalt.de/funktionsweise-waermepumpe.gif abgerufen am 09.12.11

Bild 4: Bodentemperatur in Abh. von der Teufe

http://www.forschung-geotechnik.org/Forschung/Geothermik/bodentemperatur.gif abgerufen am 09.12.11

Bild 5: PrinzipSchema SERSO Brückententeisung Schweiz

Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung NRW: GeoVerSi Studie. 16.06.05 S.72

Abrufbar unter: http://www.geoversi.nrw.de/

Bild 6: Klimamessstation Berkenthin

Dipl.-Ing K.-U. Mackert: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn
(Bundesanstalt für Straßenwesen) 27.09.11 S. 13 Abrufbar unter http://www.bast.de

Bild 7: Strahlungspyranometer:

Dipl.-Ing K.-U. Mackert: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn
(Bundesanstalt für Straßenwesen) 27.09.11 S. 14 Abrufbar unter http://www.bast.de

Bild 8: Straßenaufbau: Erstellt auf Basis der übermittelten Daten der Fa. REHAU AG

Bild 9: Spurrillen: http://www.welt.de/multimedia/archive/00889/spurrille2_DW_Wisse_889987p.jpg

abgerufen am 09.12.2011

10. Tabellen und Diagramme

Diagramm 1: Basierend auf Daten des BayernViewer sowie GoogleEarth

http://www.google.de/intl/de/earth/index.html

http://www.geodaten.bayern.de/BayernViewer2.0/index.cgi

Tabelle 1: Klima DWD (im Mittel 1961-1090)

Die Daten zu Temperatur und Sonnenstunden kommen von einer nahegelegenen Wetterstation in ca 6,5km Luftlinie bei Wunsiedel. Quelle: Deutschwer Wetter Dienst: http://www.dwd.de/ aufgerufen am 22.11.11

Tabelle 2: Kosten – Straßenaufbau

Kalkulation und Auslegung Firma REHAU

Tabelle 3: Aufstellung Peripheriekosten EAN

Eigene Berechnungen + Straßenaufbau von REHAU

Tabelle 4: Investitionskostenvergleich EAN, REHAU

Eigene Berechnungen, Auslegung REHAU

Tabelle 5: Betriebskosten

Erstellt mit Hilfe der Betriebskostenanalyse der Fa REHAU AG+Co.

11. Anhang

Anhang 1: SCHNEESCHMELZE

Investitionen und Kosten Variante 1

Temperierung unter Wärmepumpeneinsatz

	Investition	Nutzungs zeit	Annuität Zins 3,0 %	Kosten pro Jahr
Erschließung Wärmequelle (Bohrung etc.)	105.600	20	0,0672	7.098 EUR/a
Rohrregistersystem + Verbindung	42.000	20	0,0672	2.823 EUR/a
Wärmepumpe	30.000	20	0,0672	2.016 EUR/a
Mess-, Steuer- und Regelungstechnik	50.000	20	0,0672	3.361 EUR/a
Betriebsgebäude	12.000	20	0,0672	807 EUR/a
Anlagentechnik, Verrohrung, isol. Transportleitung	45.500	20	0,0672	3.058 EUR/a
Gesamtinvestitionen und Jahreskosten netto	**285.100**			**19.163 EUR/a**

Jahresgesamtkosten netto	**19.160 EUR/a**

Investitionen und Kosten Variante 2

Temperierung mit Geothermischem Wärmespeicher

	Investition	Nutzungs zeit	Annuität Zins 3,0 %	Kosten pro Jahr
Erschließung Wärmequelle (Bohrung etc.)	105.600	20	0,0672	7.098 EUR/a
Rohrregistersystem + Verbindung	42.000	20	0,0672	2.823 EUR/a
Mehrkosten für Geothermischen Speicher	82.500	20	0,0672	5.545 EUR/a
Mess-, Steuer- und Regelungstechnik	50.000	20	0,0672	3.361 EUR/a
Betriebsgebäude	12.000	20	0,0672	807 EUR/a
Anlagentechnik, Verrohrung, isol. Transportleitung	45.500	20	0,0672	3.058 EUR/a
Gesamte Investition und Kosten, netto	**337.600**			**22.692 EUR/a**

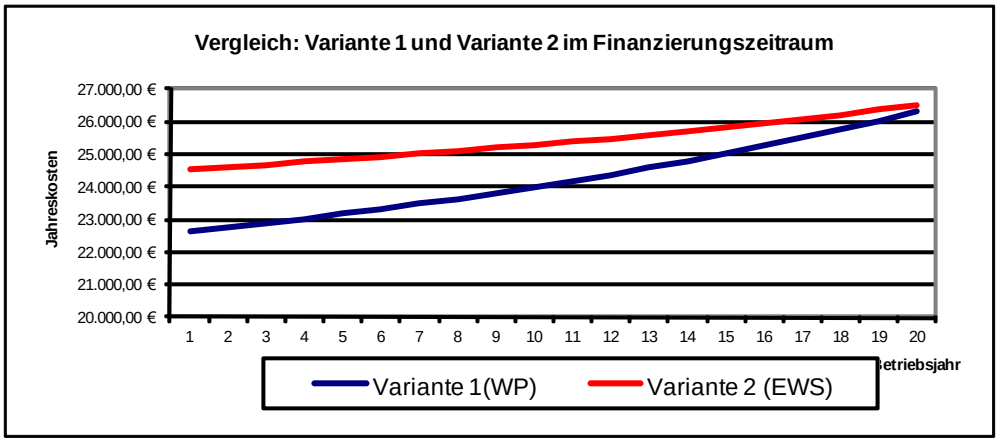
Jahresgesamtkosten netto	**22.690 EUR/a**

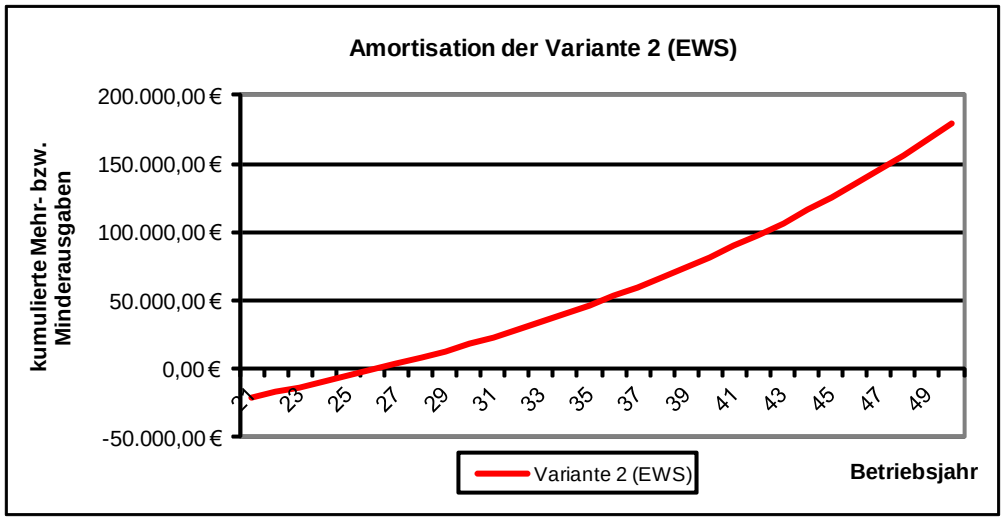
VERGLEICH

Jahresgesamtkostenunterschied Wärmepumpe zur Wärmespeicher	**-3.530 EUR/a** **-15,6 %**

Anhang 2: Betriebskosten Schneeschmelze

	Strompreis	Variante 1 (WP)		Variante 2 (EWS)		Einsparung		Mehrinvest.
Jahr	in ct/kWh	Stromkosten	Wartung/instandh.	Stromkosten	Wartung/Instandh.	Jährlich	Summiert	für Variante 2
1	16,000	1.966,40 €	1.500,00 €	1.052,80 €	800,00 €	1.613,60 €	1.613,60 €	3.539,00
2	16,800	2.064,72 €	1.530,00 €	1.105,44 €	816,00 €	1.673,28 €	3.286,88 €	7.078,00
3	17,640	2.167,96 €	1.560,60 €	1.160,71 €	832,32 €	1.735,52 €	5.022,40 €	10.617,00
4	18,522	2.276,35 €	1.591,81 €	1.218,75 €	848,97 €	1.800,45 €	6.822,86 €	14.156,00
5	19,448	2.390,17 €	1.623,65 €	1.279,68 €	865,95 €	1.868,19 €	8.691,04 €	17.695,00
6	20,421	2.509,68 €	1.656,12 €	1.343,67 €	883,26 €	1.938,87 €	10.629,91 €	21.234,00
7	21,442	2.635,16 €	1.689,24 €	1.410,85 €	900,93 €	2.012,63 €	12.642,54 €	24.773,00
8	22,514	2.766,92 €	1.723,03 €	1.481,40 €	918,95 €	2.089,61 €	14.732,14 €	28.312,00
9	23,639	2.905,27 €	1.757,49 €	1.555,47 €	937,33 €	2.169,96 €	16.902,11 €	31.851,00
10	24,821	3.050,53 €	1.792,64 €	1.633,24 €	956,07 €	2.253,86 €	19.155,97 €	35.390,00
11	26,062	3.203,06 €	1.828,49 €	1.714,90 €	975,20 €	2.341,45 €	21.497,42 €	38.929,00
12	27,365	3.363,21 €	1.865,06 €	1.800,65 €	994,70 €	2.432,93 €	23.930,35 €	42.468,00
13	28,734	3.531,37 €	1.902,36 €	1.890,68 €	1.014,59 €	2.528,46 €	26.458,81 €	46.007,00
14	30,170	3.707,94 €	1.940,41 €	1.985,21 €	1.034,89 €	2.628,25 €	29.087,07 €	49.546,00
15	31,679	3.893,34 €	1.979,22 €	2.084,47 €	1.055,58 €	2.732,50 €	31.819,57 €	53.085,00
16	33,263	4.088,00 €	2.018,80 €	2.188,70 €	1.076,69 €	2.841,42 €	34.660,98 €	56.624,00
17	34,926	4.292,40 €	2.059,18 €	2.298,13 €	1.098,23 €	2.955,22 €	37.616,21 €	60.163,00
18	36,672	4.507,02 €	2.100,36 €	2.413,04 €	1.120,19 €	3.074,16 €	40.690,37 €	63.702,00
19	38,506	4.732,38 €	2.142,37 €	2.533,69 €	1.142,60 €	3.198,46 €	43.888,83 €	67.241,00
20	40,431	4.968,99 €	2.185,22 €	2.660,37 €	1.165,45 €	3.328,39 €	47.217,21 €	70.780,00
21	42,453	5.217,44 €	2.228,92 €	2.793,39 €	1.188,76 €	3.464,22 €	50.681,43 €	
22	44,575	5.478,32 €	2.273,50 €	2.933,06 €	1.212,53 €	3.606,22 €	54.287,65 €	
23	46,804	5.752,23 €	2.318,97 €	3.079,71 €	1.236,78 €	3.754,70 €	58.042,36 €	
24	49,144	6.039,84 €	2.365,35 €	3.233,70 €	1.261,52 €	3.909,97 €	61.952,33 €	
25	51,602	6.341,84 €	2.412,66 €	3.395,39 €	1.286,75 €	4.072,36 €	66.024,69 €	
26	54,182	6.658,93 €	2.460,91 €	3.565,15 €	1.312,48 €	4.242,20 €	70.266,89 €	
27	56,891	6.991,87 €	2.510,13 €	3.743,41 €	1.338,73 €	4.419,86 €	74.686,74 €	
28	59,735	7.341,47 €	2.560,33 €	3.930,58 €	1.365,51 €	4.605,71 €	79.292,45 €	
29	62,722	7.708,54 €	2.611,54 €	4.127,11 €	1.392,82 €	4.800,15 €	84.092,59 €	
30	65,858	8.093,97 €	2.663,77 €	4.333,47 €	1.420,68 €	5.003,59 €	89.096,19 €	





Anhang 3: ENTEISUNG

Investitionen und Kosten Variante 1

Temperierung unter Wärmepumpeneinsatz

	Investition	Nutzungs zeit	Annuität Zins 3,0 %	Kosten pro Jahr
Erschließung Wärmequelle (Bohrung etc.)	52.800	20	0,0672	3.549 EUR/a
Rohrregistersystem + Verbindung	42.000	20	0,0672	2.823 EUR/a
Wärmepumpe	30.000	20	0,0672	2.016 EUR/a
Mess-, Steuer- und Regelungstechnik	50.000	20	0,0672	3.361 EUR/a
Betriebsgebäude	12.000	20	0,0672	807 EUR/a
Anlagentechnik, Verrohrung, isol. Transportleitung	45.500	20	0,0672	3.058 EUR/a
Gesamtinvestitionen und Jahreskosten netto	**232.300**			**15.614 EUR/a**

Jahresgesamtkosten netto	**15.610 EUR/a**

Investitionen und Kosten Variante 2

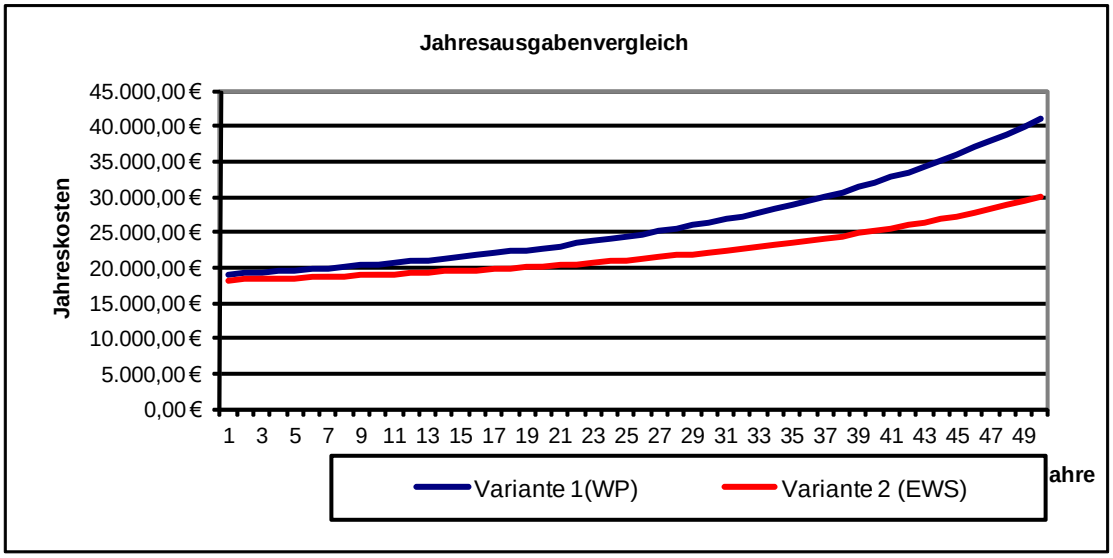
Temperierung mit Geothermischem Wärmespeicher

	Investition	Nutzungs zeit	Annuität Zins 3,0 %	Kosten pro Jahr
Erschließung Wärmequelle (Bohrung etc.)	52.800	20	0,0672	3.549 EUR/a
Rohrregistersystem + Verbindung	42.000	20	0,0672	2.823 EUR/a
Mehrkosten für Geothermischen Speicher	41.250	20	0,0672	2.773 EUR/a
Mess-, Steuer- und Regelungstechnik	50.000	20	0,0672	3.361 EUR/a
Betriebsgebäude	12.000	20	0,0672	807 EUR/a
Anlagentechnik, Verrohrung, isol. Transportleitung	45.500	20	0,0672	3.058 EUR/a
Gesamte Investition und Kosten, netto	**243.550**			**16.370 EUR/a**

Jahresgesamtkosten netto	**16.370 EUR/a**

VERGLEICH

Jahresgesamtkostenunterschied Wärmepumpe zur Wärmespeicher	**-760 EUR/a**
	-4,6 %

Anhang 4: Betriebskosten Enteisung

	Strompreis	Variante 1 (WP)		Variante 2 (EWS)		Einsparung		Mehrinvest.
Jahr	in ct/kWh	Stromkosten	Wartung/instandh.	Stromkosten	Wartung/Instandh.	Jährlich	Summiert	für Variante 2
1	16,000	1.966,40 €	1.500,00 €	1.052,80 €	800,00 €	1.613,60 €	1.613,60 €	756,00
2	16,800	2.064,72 €	1.530,00 €	1.105,44 €	816,00 €	1.673,28 €	3.286,88 €	1.512,00
3	17,640	2.167,96 €	1.560,60 €	1.160,71 €	832,32 €	1.735,52 €	5.022,40 €	2.268,00
4	18,522	2.276,35 €	1.591,81 €	1.218,75 €	848,97 €	1.800,45 €	6.822,86 €	3.024,00
5	19,448	2.390,17 €	1.623,65 €	1.279,68 €	865,95 €	1.868,19 €	8.691,04 €	3.780,00
6	20,421	2.509,68 €	1.656,12 €	1.343,67 €	883,26 €	1.938,87 €	10.629,91 €	4.536,00
7	21,442	2.635,16 €	1.689,24 €	1.410,85 €	900,93 €	2.012,63 €	12.642,54 €	5.292,00
8	22,514	2.766,92 €	1.723,03 €	1.481,40 €	918,95 €	2.089,61 €	14.732,14 €	6.048,00
9	23,639	2.905,27 €	1.757,49 €	1.555,47 €	937,33 €	2.169,96 €	16.902,11 €	6.804,00
10	24,821	3.050,53 €	1.792,64 €	1.633,24 €	956,07 €	2.253,86 €	19.155,97 €	7.560,00
11	26,062	3.203,06 €	1.828,49 €	1.714,90 €	975,20 €	2.341,45 €	21.497,42 €	8.316,00
12	27,365	3.363,21 €	1.865,06 €	1.800,65 €	994,70 €	2.432,93 €	23.930,35 €	9.072,00
13	28,734	3.531,37 €	1.902,36 €	1.890,68 €	1.014,59 €	2.528,46 €	26.458,81 €	9.828,00
14	30,170	3.707,94 €	1.940,41 €	1.985,21 €	1.034,89 €	2.628,25 €	29.087,07 €	10.584,00
15	31,679	3.893,34 €	1.979,22 €	2.084,47 €	1.055,58 €	2.732,50 €	31.819,57 €	11.340,00
16	33,263	4.088,00 €	2.018,80 €	2.188,70 €	1.076,69 €	2.841,42 €	34.660,98 €	12.096,00
17	34,926	4.292,40 €	2.059,18 €	2.298,13 €	1.098,23 €	2.955,22 €	37.616,21 €	12.852,00
18	36,672	4.507,02 €	2.100,36 €	2.413,04 €	1.120,19 €	3.074,16 €	40.690,37 €	13.608,00
19	38,506	4.732,38 €	2.142,37 €	2.533,69 €	1.142,60 €	3.198,46 €	43.888,83 €	14.364,00
20	40,431	4.968,99 €	2.185,22 €	2.660,37 €	1.165,45 €	3.328,39 €	47.217,21 €	15.120,00
21	42,453	5.217,44 €	2.228,92 €	2.793,39 €	1.188,76 €	3.464,22 €	50.681,43 €	
22	44,575	5.478,32 €	2.273,50 €	2.933,06 €	1.212,53 €	3.606,22 €	54.287,65 €	
23	46,804	5.752,23 €	2.318,97 €	3.079,71 €	1.236,78 €	3.754,70 €	58.042,36 €	
24	49,144	6.039,84 €	2.365,35 €	3.233,70 €	1.261,52 €	3.909,97 €	61.952,33 €	
25	51,602	6.341,84 €	2.412,66 €	3.395,39 €	1.286,75 €	4.072,36 €	66.024,69 €	
26	54,182	6.658,93 €	2.460,91 €	3.565,15 €	1.312,48 €	4.242,20 €	70.266,89 €	
27	56,891	6.991,87 €	2.510,13 €	3.743,41 €	1.338,73 €	4.419,86 €	74.686,74 €	
28	59,735	7.341,47 €	2.560,33 €	3.930,58 €	1.365,51 €	4.605,71 €	79.292,45 €	
29	62,722	7.708,54 €	2.611,54 €	4.127,11 €	1.392,82 €	4.800,15 €	84.092,59 €	
30	65,858	8.093,97 €	2.663,77 €	4.333,47 €	1.420,68 €	5.003,59 €	89.096,19 €