

STUDIE zur Bewertung der Alternative

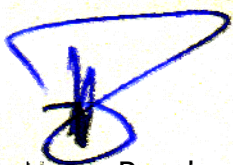
Reduzierung der im Werk Neuhoft- Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Auftraggeber: *K+S KALI GmbH
Postfach 10 20 29
34131 Kassel*

Auftragnehmer: **ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft
Geotechnik und Bergbau mbH**
Arnstädter Straße 28
99096 Erfurt

Projektnummer: EGB 06-035

Erfurt, den 1. Juni 2007


Dr. Henry Rauche
Geschäftsführer

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Kurzfassung

Im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GMBH (K+S) werden jährlich 3,7 Millionen Tonnen Hartsalz mit Hilfe des ESTA- und Flotationsverfahrens zu Kieserit- und Kalidüngemitteln verarbeitet, wobei feste Fabrikrückstände, im Wesentlichen Steinsalz, Kieserit und unlösliche Tonbestandteile, anfallen. Diese Verarbeitungsrückstände werden seit dem Beginn der Düngemittelproduktion in unmittelbarer Nähe des Fabrikstandortes aufgehaldet. Die Rückstandshalde umfasst heute etwa 98 Millionen Tonnen, wobei entsprechend der derzeitigen Produktionskapazität jährlich etwa 2,3 Millionen Tonnen Rückstände hinzukommen.

**Ausgangs-
situation**

Hauptsächlich infolge der auf die derzeitige Haldenoberfläche einwirkenden Niederschläge fallen alljährlich etwa 700.000 Kubikmeter Salzwässer an, die mineralisiert sind und entsprechend entsorgt werden müssen. Durch die zukünftige Produktion erfährt die Rückstandshalde eine Erweiterung, die mit einem Planfeststellungsbeschluss im Jahre 2003 genehmigt wurde. Mit der Haldenerweiterung ist mittelfristig ein Anstieg der jährlich anfallenden Salzwassermenge auf 1,0 bis 1,1 Millionen Kubikmeter verbunden.

Bisher wurden die Salzwässer in geringen Anteilen in den Vorfluter Fliede abgestoßen und größtenteils in die als Kluftspeicher ausgebildete geologische Formation des Plattendolomit (Zechstein 3, Perm) versenkt.

**Bisherige Praxis
der Entsorgung**

Die in den vergangenen Jahren durchgeführten geologischen Erkundungsarbeiten zum Nachweis weiterer Versenkräume im Plattendolomit haben ergeben, dass der Kluftspeicher künftig keine langfristige Entsorgungsmöglichkeit für die Salzwässer bietet. Den Nebenbestimmungen zum Planfeststellungsbeschluss der Haldenerweiterung aus dem Jahre 2003 folgend, muss K+S nunmehr andere gesicherte Entsorgungswege für die anfallenden Salzwässer aufzeigen.

**Notwendigkeit
alternativer
Entsorgungs-
wege**

Dementsprechend hat K+S alle grundsätzlich denkbaren technischen Möglichkeiten zur Beseitigung und/oder Reduzierung der zur Entsorgung anfallenden Salzwässer, einschließlich der Reduzierung der aufzuhaldenden Rückstandsmengen untersucht und im Ergebnis eine Vorzugsvariante ermittelt.

**Alternativen zur
Entsorgung der
Salzwässer**

Zur dauerhaften langfristigen Entsorgung plant K+S die hauptsächlich an der Rückstandshalde des Werkes Neuhoof-Ellers anfallenden Salzwässer durch eine 63 km lange Rohrleitung zur Heißlösefabrik Hattorf des Werkes Werra zu transportieren, um in der dort betriebenen Kieseritwäsche eine Verwertung dieser mineralisierten Salzwässer vorzunehmen.

**Vorzugsvariante
für die Verwer-
tung der Salz-
wässer**

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Um auch externen Sachverstand in die - für die weitere Produktion im Werk Neuhoof-Ellers wesentliche - Identifikation der Vorzugsvariante einzubeziehen, hat K+S die ERCOSPLAN INGENIEURGESELLSCHAFT GEOTECHNIK UND BERGBAU MBH (ERCOSPLAN) - ein erfahrenes Ingenieurunternehmen, das seit mehr als einem halben Jahrhundert für die Kali- und Steinsalzindustrie Deutschlands und seit etwa 15 Jahren für die Mineralsalzindustrie weltweit tätig ist - mit einer Bewertung der grundsätzlich denkbaren technischen Möglichkeiten zur Beseitigung und/oder Reduzierung der zur Entsorgung anfallenden Salzwässer beauftragt.

Bewertung der Alternativen hinsichtlich der technischen Machbarkeit, der ökologischen Nachhaltigkeit und der wirtschaftlichen Vertretbarkeit

In diesem Zusammenhang wurden die verfahrenstechnischen Prozessabläufe, die technologischen Voraussetzungen, die erreichbaren Ziele und die Kosten für die Anwendung der einzelnen technischen Varianten seitens ERCOSPLAN im Rahmen von Konzeptstudien untersucht, vergleichend analysiert und abschließend hinsichtlich der technischen Machbarkeit, der ökologischen Nachhaltigkeit und der wirtschaftlichen Vertretbarkeit bewertet. Neben den verschiedenen technologischen Aspekten einer Anwendung dieser Alternativen im Werk Neuhoof-Ellers wurden auch Bezüge zu entsprechenden Referenzfälle bzw. -anlagen hergestellt.

Anhand der Resultate dieser Untersuchungen wurde abschließend eine zusammenfassende Bewertung der bei der Umsetzung der einzelnen Alternativen erreichbaren Ziele vorgenommen und dabei insbesondere geklärt, inwieweit durch die alternativen Entsorgungsszenarien eine umfassende und nachhaltige Lösung der bestehenden Entsorgungsprobleme erreicht werden kann.

Die vorliegende Studie fasst die Ergebnisse dieser Untersuchungen zur Kristallisation durch thermische Eindampfung bzw. durch Tiefkühlung der Salzwässer zusammen.

ALTERNATIVE Eindampfen oder Tiefkühlen der Salzwässer

Diese ALTERNATIVE ging zunächst von der Erwartung aus, dass durch die Eindampf- oder Tiefkühlkristallisation die Menge der zu entsorgenden Salzwässer verringert sowie zum Anderen ein verwertbares Kalium-Magnesium-Salz erzeugt und dadurch ein Deckungsbeitrag zur Finanzierung der aufwendigen Eindampf- und/oder Tiefkühlanlage und deren Betrieb erreicht werden kann.

Dies wird prinzipiell durch die Ergebnisse der eingehenden Untersuchungen bestätigt. Bei der Tiefkühlkristallisation wird nur eine geringe und bei der teilweisen Eindampfkristallisation eine merkliche Lösungsmengenreduktion erreicht, ohne allerdings verwertbare Kristallisate zu erhalten. Bei der vollständigen Eindampfung dagegen verbleibt keine Restlösungsphase, jedoch sind die Wertstoffinhalte des Kristallisates außerordentlich gering. Außerdem würde die vollständige Eindampfung der anfallenden Salzwässer einen hohen Verbrauch fossiler Energieträger erfordern, welche wiederum eine beträchtliche CO₂-Emission in die Umwelt mit sich bringt und daher weder ökologisch noch wirtschaftlich vertretbar ist.

Ungenügende Qualität der Kristallisationsprodukte

Aufgrund des für alle Kristallisationsverfahren hohen Energiebedarfes war es folgerichtig, auch den Einsatz alternativer Energieträger bzw. -erzeugung für die Heizdampferzeugung bzw. die Elektroenergieerzeugung zum Tiefkühlen zu untersuchen. Die Nutzung von Solar- und Windenergie scheitert am Bedarf enormer Flächen für die Installation der Anlagen. Um ausreichende Energie für die Erzeugung des Heizdampfes für die Eindampfanlage aus geothermischen Poten-

Nutzung alternativer Energien

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

zieren zu nutzen, ist das Hot-Dry-Rock-Verfahren geeignet, was jedoch wegen der potenziellen Initiierung seismischer Ereignisse aus bergbausicherheitlichen Gründen nicht in Frage kommen kann.

Der ausgesprochen hohe Energiebedarf für die Eindampfung gering mineralisierter Salzwässer und der damit verbundene finanzielle Aufwand für die Anlagengenerichtung sowie den Betrieb, gepaart mit dem Auftreten nicht verwertbaren Kristallisates sind Ursache dafür, dass weder die thermische Eindampfung noch die Tiefkühlkristallisation in der Kaliindustrie weltweit zur Rückgewinnung von Wertstoffträgern aus gering mineralisierten Salzwässern praktiziert werden. Der hier unternommene Versuch, einen Vorschlag für die Realisierung der Volleindampfung bzw. der Laugentiefkühlung für die im Werk NE anfallenden Salzwässer vorzulegen, kann deshalb auch nicht als Stand der Technik gelten.

**Vergleich mit
dem internatio-
nalen Stand der
Technik**

Diese ALTERNATIVE stellt deshalb keine effektive Lösung des Entsorgungsproblems für die im Werk Neuhof-Ellers anfallenden Salzwässer dar.

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Veranlassung und Aufgabenstellung | 10 |
| 2 | Randbedingungen für die Entsorgung der im Werk Neuhof-Ellers anfallenden Fabrikrückstände und Salzwässer | 11 |
| 2.1 | Rohstoffbasis und Produktpalette | 11 |
| 2.2 | Produktionskapazität und resultierende Rückstandsmengen | 12 |
| 2.3 | Standort und Aufbau der Rückstandshalde Neuhof | 14 |
| 2.4 | Mengenbilanz der zur Entsorgung im Werk NE anfallenden Salzwässer und Erläuterung zu den bislang praktizierten Entsorgungspfaden | 17 |
| 3 | Reduzierung und/oder Entsorgung der im Werk Neuhof-Ellers anfallenden Salzwässer durch Eindampfen oder Tiefkühlen | 23 |
| 3.1 | Ergebnisse von phasentheoretischen und Laboruntersuchungen zur Eindampfung der zur Entsorgung im Werk NE anfallenden Salzwässer | 24 |
| 3.2 | Technologisches Konzept für die vollständige thermische Eindampfung der im Werk Neuhof-Ellers zur Entsorgung anfallenden Salzwässer | 28 |
| 3.3 | Technologisches Konzept für die teilweise thermische Eindampfung der im Werk Neuhof-Ellers zur Entsorgung anfallenden Salzwässer | 28 |
| 3.4 | Technologisches Konzept für das Tiefkühlen der im Werk Neuhof-Ellers zur Entsorgung anfallenden Salzwässer | 29 |
| 3.4.1 | Erfahrungstatsachen für den Einsatz der Tiefkühlung von konzentrierten Salzlösungen und Salzwässern in der Kaliindustrie am Beispiel des ehemaligen Kaliwerkes Merkers | 30 |
| 3.4.2 | Anwendung der Tiefkühlkristallisation zur Entsorgung der anfallenden Salzwässer des Werkes Neuhof-Ellers | 32 |
| 3.5 | Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten für die Prozessstufe der Eindampfkristallisation durch konventionelle Heizdampferzeugung auf der Basis von Primärenergieträgern | 33 |
| 3.6 | Möglichkeiten für den Einsatz alternativer Energieträger und/oder -erzeugung bei der Eindampfung von Salzwässern am Standort Neuhof-Ellers | 34 |
| 3.7 | Zusammenfassende Bewertung der technischen Machbarkeit und wirtschaftlichen Vertretbarkeit der Eindampfung der zur Entsorgung | |

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

anfallenden Salzwässer unter Ausnutzung alternativer Energieträger/-
erzeugung 42

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen 43

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

| | | |
|--------------|---|----|
| Abbildung 1 | Satellitenaufnahme der Rückstandshalde Neuhoof (Google Earth 2007; die kurze Bildkante entspricht der N-S-Richtung; die lange Bildkante entspricht etwa 3,5 km in der Natur) | 14 |
| Abbildung 2 | Anhand einer Satellitenaufnahme numerisch modelliertes Reliefbild der Rückstandshalde Neuhoof (Google Earth 2007; Blickrichtung aus SSE). Deutlich zu erkennen sind die plateauartige Ausbildung des Haldenkopfes sowie die Steiflanke am westlichen Verkipfungspunkt. | 15 |
| Abbildung 3 | Darstellung der Monatsmittelwerte zum Salzwasseranfall im Grabensystem am Fuß der Halde Neuhoof und der am Standort gemessenen Niederschlagsmenge | 18 |
| Abbildung 4 | Darstellung der Monatsmittelwerte zum Salzwasseranfall im Grabensystem am Fuß der Halde Neuhoof und der am Standort gemessenen Niederschlagsmenge (mit polynomischer Regression der Monatswerte) | 19 |
| Abbildung 5 | Darstellung der Monatsmittelwerte zum Salzwasseranfall im Grabensystem am Fuß der Halde Neuhoof und der am Standort gemessenen Niederschlagsmenge (mit linearer Regression der Monatswerte) | 19 |
| Abbildung 6 | Darstellung der 2-Monatsmittelwerte zum Salzwasseranfall im Grabensystem am Fuß der Halde Neuhoof und der am Standort gemessenen Niederschlagsmenge (mit linearer Regression der 2-Monatswerte) | 20 |
| Abbildung 7 | Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der im Werk Neuhoof-Ellers anfallenden Salzwässer | 21 |
| Abbildung 8 | Veranschaulichung der chemischen Zusammensetzung der zur Entsorgung anfallenden Lösung und Darstellung ihrer Gleichgewichtsbeziehungen zu festen Mineralphasen im quaternären System der ozeanischen Salze nach JÄNECKE im Zuge einer sukzessiven isothermen Eindampfung bei 90°C | 26 |
| Abbildung 9 | Phasenbestand des Bodenkörpers bei vollständiger Eindampfung der zur Entsorgung im Werk Neuhoof-Ellers anfallenden Salzwässer | 27 |
| Abbildung 10 | Tiefkühlanlage für Salzwässer und -lösungen | 31 |

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

| | | |
|--------------|--|----|
| Abbildung 11 | Temperaturverteilung im Untergrund Deutschlands für 1000, 2000 und 3000 m Tiefe | 41 |
|--------------|--|----|

VERZEICHNIS DER TABELLEN

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabelle 1 | Lösungszusammensetzung für die Referenzanlage im Kaliwerk Merkers | 30 |
| Tabelle 1 | Gegenüberstellung der abgeschätzten Kosten für die Dampferzeugung aus Gas und durch elektrische Energie aus der Solarzelle | 36 |
| Tabelle 2 | Beispiele für Windkraftanlagen in Deutschland | 38 |

Reduzierung der im Werk Neuhoﬀ-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

VERZEICHNIS DER ANHÄNGE

| | |
|----------|--|
| ANHANG A | Ergebnisse von theoretischen Berechnungen und Laborversuchen zur Eindampfung der zur Entsorgung im Werk Neuhoﬀ-Ellers anfallenden Salzwässer |
| ANHANG B | Referenzdaten zur Nutzung alternativer Energieträger bzw. -erzeugung in Mitteleuropa |

VERZEICHNIS DER ANLAGEN

| | |
|----------|---|
| ANLAGE 1 | Lageplan Werk Neuhoﬀ-Ellers Darstellung der Tagesanlagen, der Halde des Werkes Neuhoﬀ-Ellers sowie Teile der Ortslage Neuhoﬀ mit Angabe der Geländehöhen |
|----------|---|

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Bei der Verarbeitung von Hartsalz¹ fallen im Werk Neuhoof-Ellers (NE) der K+S KALI GmbH (K+S) feste Rückstände, im Wesentlichen Steinsalz (Halit)², Kieserit³ und unlösliche Tonbestandteile an. Diese Verarbeitungsrückstände werden seit dem Beginn der Düngemittelproduktion in unmittelbarer Nähe des Fabrikstandortes aufgehaldet. Die Rückstandshalde umfasst heute etwa 98 Millionen t, wobei entsprechend der derzeitigen Produktionskapazität jährlich etwa 2,3 Millionen t Rückstände hinzukommen.

Hauptsächlich infolge der auf die Haldenoberfläche und auf die versiegelten Flächen innerhalb des Werksgeländes einwirkenden Niederschläge fallen alljährlich etwa 700.000 m³ Salzwässer an, die mineralisiert sind und entsprechend entsorgt werden müssen. Durch die bereits im Jahr 2003 im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens genehmigte Erweiterung der Rückstandshalde wird sich auch der Anfall an Salzwässern vergrößern und künftig etwa 1,0 bis 1,1 Millionen m³ erreichen.

Derzeit werden die anfallenden Salzwässer größtenteils in den Kluftspeicher des Plattendolomit (Leine-Folge, Zechstein) versenkt und in geringeren Mengen über das Flüsschen Fliede in die Vorflut abgestoßen. Diese Entsorgungspfade erweisen sich jedoch für die angewachsene Menge an Abstoßlösungen als unzureichend. In diesem Zusammenhang sucht K+S auch nach alternativen Entsorgungsmöglichkeiten für die anfallenden Salzwässer und beabsichtigt, hierbei auch externe Erfahrungsträger einzubeziehen.

Dabei sollen die Untersuchungen dem Ziel dienen, diese grundsätzlich denkbaren Entsorgungsszenarien hinsichtlich ihrer Technologie und den notwendigen Anlagenkomponenten planerisch soweit zu konzipieren, dass eine Bewertung der technischen Machbarkeit und der ökonomischen Effizienz möglich wird.

In einer Besprechung am 21.08.2006 hat K+S diese Aufgabenstellung gegenüber ERCOSPLAN INGENIEURGESELLSCHAFT GEOTECHNIK UND BERGBAU MBH (im Folgenden ERCOSPLAN) erläutert und um Abgabe eines entsprechenden Leistungsangebots gebeten.

Auf der Grundlage des Angebotes vom 30.08.2006 wurde ERCOSPLAN mit Bestellung, Nr. 6700105106/000362K vom 18.09.2006, mit der Bearbeitung dieser Aufgabenstellung beauftragt.

¹ Hartsalz ist ein Kalisalzgestein, dessen Wertstoffkomponenten das Kalium-Mineral Sylvit (chemisch: KCl) und im Werra-Fulda-Kalirevier weiterhin der Kieserit (chemisch: MgSO₄ x H₂O) sind.

² chemisch: NaCl

³ chemisch: MgSO₄ x H₂O

2 Randbedingungen für die Entsorgung der im Werk Neuhoof-Ellers anfallenden Fabrikrückstände und Salzwässer

In den folgenden Abschnitten wird zunächst ein kurzer historischer Abriss der Kali-Düngemittelproduktion am Standort Neuhoof-Ellers und der damit verbundenen Notwendigkeit zur Entsorgung anfallender Verarbeitungsrückstände sowie der hauptsächlich in der Folge der Aufhaltung dieser Rückstände anfallenden Salzwässer gegeben.

Ausgehend von der heutigen Produktionskapazität werden im Anschluss Massen-Volumen-Bilanzen zur Rohsalzgewinnung und -verarbeitung sowie den dabei anfallenden Rückständen und den als Folge der Aufhaltung der festen Rückstände anfallenden Salzwässer erläutert. Dies erfolgt insbesondere zur Identifikation der spezifischen Randbedingungen des Standortes Neuhoof-Ellers, wie sie bei der Entwicklung von Entsorgungsalternativen zwingende Berücksichtigung erfahren müssen.

Darüber hinaus werden der Standort und der Aufbau der Rückstandshalde sowie die bislang praktizierten Entsorgungspfade des Werkes NE beschrieben.

2.1 Rohstoffbasis und Produktpalette

Als Rohstoffbasis für die Kali-Düngemittelproduktion im Werk NE dienen die beiden Kaliflöze *Thüringen* und *Hessen* (Werra-Folge des Zechstein, Perm) der Fulda-Kalilagerstätte, die hier mit besonders hohen Wertstoffgehalten von bis zu 17 % Sylvin⁴ und etwa 21 % Kieserit⁵ - in Summe also etwa 40 % - auch im internationalen Maßstab eine besondere Stellung einnimmt. Aus diesen Rohsalzen werden im Werk NE neben MOP⁶-Produkten auch hochwertigere SOP⁷-Produkte hergestellt. Besonders die letztgenannten SOP-Produkte besitzen für die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Kaliindustrie am internationalen Markt eine herausragende Bedeutung: während K+S

⁴ Das Kalium-Mineral Sylvin (KCl) ist ein wesentlicher Wertstoffträger der Hartsalze und enthält 63,2 Masse-% K₂O.

⁵ Das Magnesiumsulfat-Mineral Kieserit (MgSO₄ x H₂O) wird hauptsächlich zur Herstellung sulfatischer Düngemittel verwendet und ist damit ein weiterer Wertstoffträger der Hartsalze im Werra-Fulda-Kalirevier.

⁶ MOP - *Muriate of Potash* - ist die internationale Bezeichnung für klassische KCl-Düngemittelprodukte, deren Herstellung sowohl auf der Grundlage chloridischer als auch sulfatischer Kalilagerstätten möglich ist.

⁷ SOP - *Sulphate of Potash* - ist die internationale Bezeichnung für hochwertige Kali-Düngemittelprodukte, deren wirtschaftliche Herstellung nur auf Grundlage der relativ seltenen sulfatischen Kalilagerstätten möglich ist.

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

etwa 13 % zur weltweiten Kali-Düngemittelproduktion beiträgt, liegt ihr Marktanteil bei den sulfathaltigen Düngemitteln bei etwa 27 %.

Die Lagerstätte wurde durch die Schächte Neuhoof (Teufzeitraum 1906 - 1909) und Ellers (Teufzeitraum 1912 - 1921) aufgeschlossen. Das Bergwerk Neuhoof-Ellers (NE) ging 1921 in Förderung, wurde jedoch im Zuge des Reichskaligesetzes bereits im Jahre 1926 stillgelegt. Zur Kompensation der durch die deutsche Teilung im Osten verlorenen Produktionskapazitäten nahm die WINTERSHALL AG das Werk NE 1954 wieder in Betrieb. Mit der Wiederinbetriebnahme erfolgte auch die Umstellung der Rohsalzverarbeitung vom früheren Heißlösebetrieb auf das Flotationsverfahren.

Die für den gesamten Industriezweig wesentlichste Neuerung zur Rohsalzverarbeitung wurde im Zeitraum 1965 bis 1974 im Werk NE zur industriellen Reife entwickelt: die elektrostatische Aufbereitung⁸ (ESTA) von Kali-Rohsalzen wurde hier 1974 im industriellen Maßstab zur Abtrennung des Kieserit von Sylvin und Halit eingeführt.

Dieses wasserfreie und daher energetisch effiziente Aufbereitungsverfahren ermöglichte nunmehr eine ökonomisch vertretbare industrielle Nutzung der Kieserit-Komponente der Hartsalze, die früher mangels geeigneter Verarbeitungsverfahren mit dem Rückstand aufgehaldet wurde.

2.2 Produktionskapazität und resultierende Rückstandsmengen

Derzeit fördert das Bergwerk NE jährlich etwa 3.700.000 t Rohsalze mit einer mittleren Rohsalzdichte von 2,20 t/m³, wobei unter Tage etwa 1,7 Millionen m³/a Gruben-hohlraum entstehen. In der Fabrik des Werkes NE werden diese Rohsalze mit Hilfe des Flotations- und ESTA-verfahrens zu Kali- und Magnesiumdüngemitteln verarbeitet, wobei aus der laufenden Produktion jährlich eine Masse von etwa 2,3 Millionen t Verarbeitungsrückstände anfallen.

An jährlich durchschnittlich 300 Betriebstagen der Fabrik entspricht dies einer täglich aufzuhaldenden Masse von etwa 8.000 t.

⁸ Autenrieth, H. (1957): DE Pat. 1 056 551. – Kali-Forschungsanstalt, 1957
Singewald, A.; Fricke, G. (1966): DE Pat. 1 249 783. – Wintershall Aktiengesellschaft, 1966
Autenrieth, H. (1969): Über die elektrostatische Aufbereitung von Kalirohsalzen. – In: Kali Steinsalz 5, Nr. 5, S. 171-177, 1969
Fricke, G. (1986): Die elektrostatische Aufbereitung von Kalium- und Magnesiumsalzen. – In: Kali Steinsalz 9, Nr. 9, S. 287-295, 1986
Singewald, A.; Fricke, G. (1983): Die elektrostatische Aufbereitung von Kali-Rohsalzen. – In: Chemie Ingenieur Technik 55, Nr. 1, S. 39-45, 1983;
Bock, R. (1981): Elektrostatische Trennung der Komponenten von Kali-Rohsalzen. – In: Chemie Ingenieur Technik 53, Nr. 12, S. 916-924, 1981

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Der mittlere Korndurchmesser des bei der Rohsalzverarbeitung im Flotationsbetrieb anfallenden Rückstandes liegt um 1 mm. Die Rückstände werden nach der letzten Flotationsstufe fabrikfeucht mit 4 bis 5 % Haftlösung ausgeschleust und über eine 1.400 m lange Bandanlage zum Haldenplateau gefördert und dort abgekippt. Die Schüttdichte des fabrikfeuchten Rückstandes beträgt etwa 1,2 t/m³. Bei der derzeitigen Produktionskapazität hat die Halde des Werkes NE einen jährlichen Bruttovolumenzuwachs von etwa 1,45 Millionen m³.

Seit Einführung der industriellen Nutzung der ESTA im Jahre 1974 bestehen die festen Verarbeitungsrückstände des Werkes NE ausschließlich aus NaCl, MgSO₄, geringen Mengen CaSO₄ sowie unlöslichen Tonmineralen und Doppelsalzen. Neben unvermeidbaren geringen Wertstoffverlusten über die festen Rückstände gelangen durch den Feuchtegehalt der Rückstände, das heißt durch die geringen Mengen anhaftender Verarbeitungslösungen auch KCl und MgCl₂ in den Haldenkörper, die zusammen jedoch deutlich weniger als 0,5 % der feuchten Rückstandsmenge ausmachen.

Vor Einführung der ESTA enthielten die Flotationsrückstände im Vergleich zur heute großen Menge an Kieserit (MgSO₄ · H₂O) noch viel erheblichere Mengen, die heute aufgrund der Überschüttung mit den danach aufgehaldeten Rückständen im Haldenkern lagern und dort - wenn auch weniger intensiv als die an der Haldenoberfläche befindlichen Rückstandsvolumina - an den meteorisch angetriebenen Wechselwirkungen mit dem Niederschlagswässern teilnehmen.

2.3 Standort und Aufbau der Rückstandshalde Neuhoﬀ

Die Rückstandshalde befindet sich etwa 400 m nordwestlich der Ortslage Neuhoﬀ, unmittelbar nördlich des Fabrikstandortes des Werkes NE (Abbildung 1).



Abbildung 1 Satellitenaufnahme der Rückstandshalde Neuhoﬀ (Google Earth 2007; die kurze Bildkante entspricht der N-S-Richtung; die lange Bildkante entspricht etwa 3,5 km in der Natur)

Die Haldenbewirtschaftung unterliegt gemäß dem Bundesberggesetz⁹ (BBergG) einem Betriebsplanverfahren, in dem u.a. auch die markscheiderischen Aufmäße des Haldenkörpers verbindlich geregelt sind. Aus dem in diesem Zusammenhang aktuell

⁹ Im Bundesberggesetz (BBergG), in der gültigen Fassung vom 13. August 1980, § 51 (Betriebsplanpflicht) und § 52 (Betriebspläne für die Errichtung und Führung des Betriebes) werden die Anforderungen an das Betriebsplanverfahren geregelt.

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

nachgetragenen Tagesriss (ANLAGE 1) lässt sich die Morphologie des Haldenkörpers wie folgt charakterisieren:

Der Haldenkörper ist in grober Näherung vergleichbar mit einem Kegelstumpf über einer annähernd elliptischen Grundfläche. In Ost-West-Richtung hat der Haldenkörper derzeit eine maximale **Ausdehnung** von etwa 1.100 m und in N-S-Richtung von etwa 800 m. Die Halde ist heute bis zu einer Höhe von etwa 200 m über Flur aufgeschüttet.

Im **Kopfbereich des Haldenkörpers** befindet sich ein Ost-West-gerichtetes Plateau, welches über eine Länge von mehr als 700 m geodätische Höhen zwischen 485 bis 495 mNN erreicht und somit durchschnittlich 155 m über Flur liegt. Der **maximale Höhenunterschied** von etwa 200 m wird am westlichen Verkipfungspunkt erreicht (Abbildung 2).



Abbildung 2 Anhand einer Satellitenaufnahme numerisch modelliertes Reliefbild der Rückstandshalde Neuhof (Google Earth 2007; Blickrichtung aus SSE). Deutlich zu erkennen sind die plateauartige Ausbildung des Haldenkopfes sowie die Steiflanke am westlichen Verkipfungspunkt.

Der durch die physikalischen Eigenschaften der aufgehaldeten Rückstände - im Wesentlichen durch die anhaftende Feuchte und die Korngrößenverteilung - kontrollierte Auslaufkegel weist an der Halde Neuhof einen **Schüttwinkel** von durchschnittlich 36° mit einer relativ geringen Streubreite auf.

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Am Haldenfuß nimmt die Rückstandshalde derzeit eine **zur Aufhaltung vorbereitete Fläche** von etwa 855.000 m² (85,5 ha) ein. Mit der bereits im Jahr 2003 im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens genehmigten Erweiterung der Rückstandshalde wird diese Fläche auf etwa 1.150.000 m² (115 ha) anwachsen. Bisher wurden insgesamt etwa 98 Millionen t Verarbeitungsrückstände aufgehaldet. Das **Volumen** der Rückstandshalde des Werkes NE beträgt etwa 65 Millionen m³.

Am Haldenplateau werden in einem durchschnittlichen Jahr an mehr als 60 Tagen **Windgeschwindigkeiten** > 7 m/s gemessen¹⁰, was mehr als der doppelten mittleren Windgeschwindigkeit im Umfeld des Standortes NE entspricht¹¹. Insbesondere an den westlichen und nordwestlichen Steiflanken der Halde Neuhoof treten heftige Fallwinde auf, deren turbulente Dynamik durch lokal begrenzte Materialaufwirbelungen zu beobachten ist.

Anders als Deponiekörper oder Halden des Kohle- und Erzbergbaus besitzen Rückstandshalden der Kaliindustrie eine aufgrund langzeitiger Kompaktions- und Kristallisationseffekte massive **Kernzone**, die von durchlässigeren, durch Lösungs- und Auswaschungsprozesse beeinflussten **Randbereichen** umhüllt wird. Aufgrund der mit den Lösungs- und Auswaschungsprozessen verbundenen Schaffung von sekundärem Porenraum besitzen die Randbereiche häufig sehr gute Durchlässigkeiten wie auch Speicherkapazitäten und werden daher in der Regel lösungsführend angetroffen.

Dieser sekundäre Porenraum ist das Ergebnis der Auflösung der löslichen Bestandteile des Verarbeitungsrückstandes durch die zutretenden ungesättigten Niederschlagswässer und der mechanischen Erosion durch meteorische Einflüsse. Aufgrund der morphologischen Exposition der Rückstandshalden kommt der vom Wind angetriebenen Abrasion¹² dabei eine erhebliche Bedeutung zu, was sich z. B. in horizontalen, der vorherrschenden Windrichtung folgenden Lösungskanälen zeigt.

Aus diesen **Auflösungs- und Abrasionsprozessen** resultiert die Tatsache, dass die Haldenoberfläche stets sehr unregelmäßig geformt, von unterschiedlich starken Setzungen betroffen, von Lösungshohlräumen korrodiert sowie durch scharfkantige Karren und Schratten¹³ charakterisiert ist.

Die aktive **Salzauflösung** der zutretenden Niederschlagswässer findet an der Kontaktfläche zwischen diesen Randbereichen und dem darunter befindlichen mehr oder minder kompaktem Kern statt.

¹⁰ Messdaten des Werkes Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH

¹¹ vgl. hierzu: KASANG, D. (2004): Windenergie.- Hamburger Bildungsserver <http://lbs.hh.schule.de>

¹² Abrieb oder Abschleiß von Festkörpern durch in Wasser oder Luft enthaltenen Feststoffteilchen

¹³ Als Karren und Schratten bezeichnet man in den Geowissenschaften Oberflächenformen in verkarteten, das heißt von chemischen Auflösungsprozessen betroffenen Gesteinen (Karst). Die Namen Karren und Schratten stammen aus den nördlichen Kalkalpen in Österreich, wo diese Begriffe für die unterschiedlich intensiven Zerfurchungen der Oberfläche von Kalksteinen verwendet werden.

2.4 Mengenbilanz der zur Entsorgung im Werk NE anfallenden Salzwässer und Erläuterung zu den bislang praktizierten Entsorgungspfaden

Der weitaus größte Anteil der vom Haldenkörper abströmenden Salzwässer wurde und wird in einem am Fuß der Halde angelegten Grabensystem gesammelt und letztendlich nach behördlich vorgegebenen Auflagen kontrolliert entsorgt.

Die als Monatsmittelwerte vorliegenden Erfassungsdaten der Jahre 2000 bis 2005 zeigen¹⁰, dass im Werk NE durchschnittlich etwa 700.000 m³ Salzwässer pro Jahr anfallen und kontrolliert abgestoßen bzw. entsorgt werden müssen. Die jährliche Schwankungsbreite beträgt ca. ± 200.000 m³, wobei

das Maximum von 952.704 m³ Salzwässer in dem niederschlagsreichen Jahr 2002 (Durchschnitt Deutschland: 1.017 mm/m² Niederschlag¹⁴, bzw. Neuhof über 980 mm/m²¹⁰)

und

das Minimum von 549.202 m³ Salzwässer in dem niederschlagsarmen Jahr 2004 (Durchschnitt Deutschland: 812 mm/m² Niederschlag¹⁵, bzw. Neuhof 560mm/m²¹⁰)

aufgetreten sind.

In einem durchschnittlichen Monat dieser 6 Jahre fallen statistisch 57.700 m³ an, wobei die monatliche Streubreite mit ± 14.000 m³ relativ groß ist.

Die Auswertung der vorliegenden Daten zeigt Zusammenhänge, wie sie auch von anderen Rückstandshalden der Kaliindustrie bekannt sind. Auch für das Werk NE gilt, dass die aus dem Haldenkörper austretende Menge der Salzwässer grundsätzlich von den auf die Haldenoberfläche (Haldenkopf + Haldenflanken) einwirkenden Niederschlägen kontrolliert wird. Eine diesbezügliche Auswertung für die Jahre 2000 bis 2005 lässt anhand der Monatswerte von Salzwasseranfall (m³/Monat) und Niederschlagsmenge (mm/Monat bzw. l/m²) zunächst keine direkte Korrelation erkennen (Abbildung 3), da für die zeitliche Korrelation die Transferzeit der Niederschläge durch den Haldenkörper bis zu den Austrittsstellen, insbesondere des über den Haldenkopf migrierenden größeren Anteils, zu berücksichtigen ist.

Die Regression der monatlichen Einzelwerte bildet den Trend beider Datenreihen ab und veranschaulicht auf diese Weise die ursächliche Abhängigkeit. Die linear als auch die polynomisch gemittelten Monatswerte zeigen dagegen für den Zeitraum dieser 72 Monate (2000 bis 2005) den Zusammenhang zwischen abnehmender Niederschlags-

¹⁴ DWD Deutscher Wetterdienst (2003): Klimastatusbericht 2002.- <http://www.dwd.de>

¹⁵ DWD Deutscher Wetterdienst (2005): Klimastatusbericht 2004.- <http://www.dwd.de>

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

menge und Rückgang des Salzwasseranfalls am Haldenfuß (Abbildung 4 und Abbildung 5) deutlich.

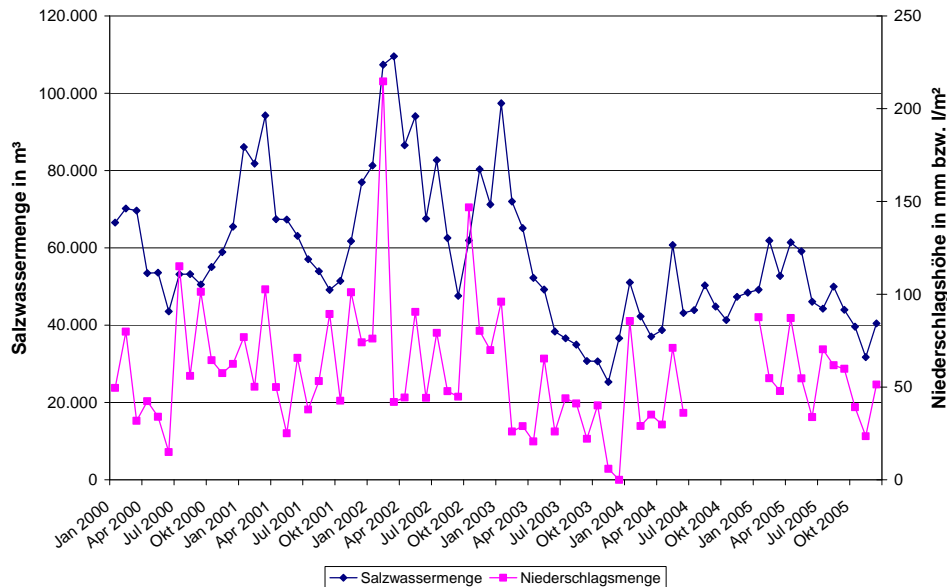


Abbildung 3 Darstellung der Monatsmittelwerte zum Salzwasseranfall im Grabensystem am Fuß der Halde Neuhoof und der am Standort gemessenen Niederschlagsmenge

Die unmittelbare Abhängigkeit der Menge der anfallenden Salzwässer von den Niederschlägen der vorangegangenen Zeiträume lässt sich statistisch für den gesamten Beobachtungszeitraum 2000 bis 2005 auch durch die nahezu perfekte Korrelation der 2-Monatsmittelwerte zeigen (Abbildung 6). Aus diesen Diagrammen wird auch ersichtlich, dass der Transfer-Zeitraum der an der Oberfläche eindringenden Niederschläge bis hin zu den Austrittskanälen etwas mehr als 2 Monate betragen muss.

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

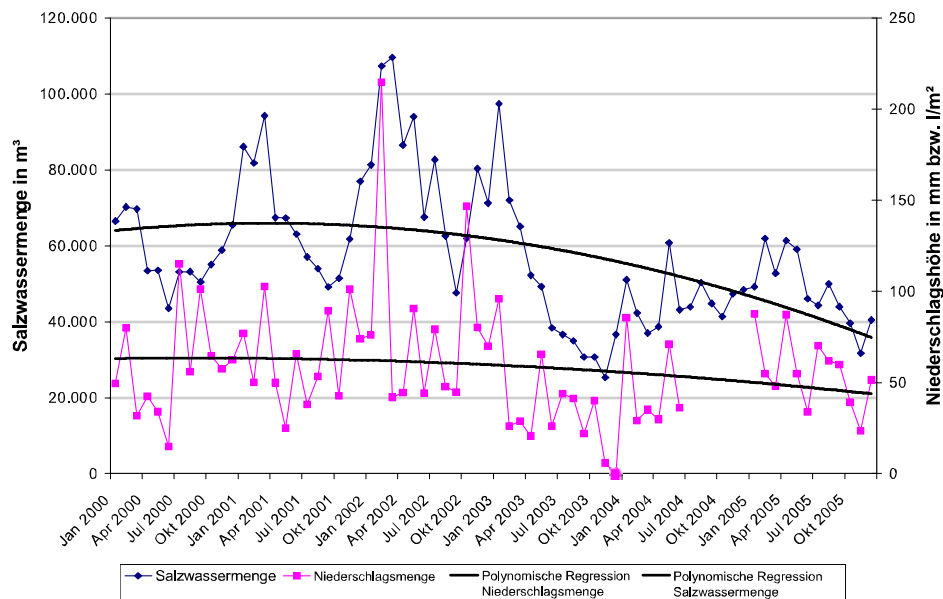


Abbildung 4 Darstellung der Monatsmittelwerte zum Salzwasseranfall im Grabensystem am Fuß der Halde Neuhoof und der am Standort gemessenen Niederschlagsmenge (mit polynomischer Regression der Monatswerte)

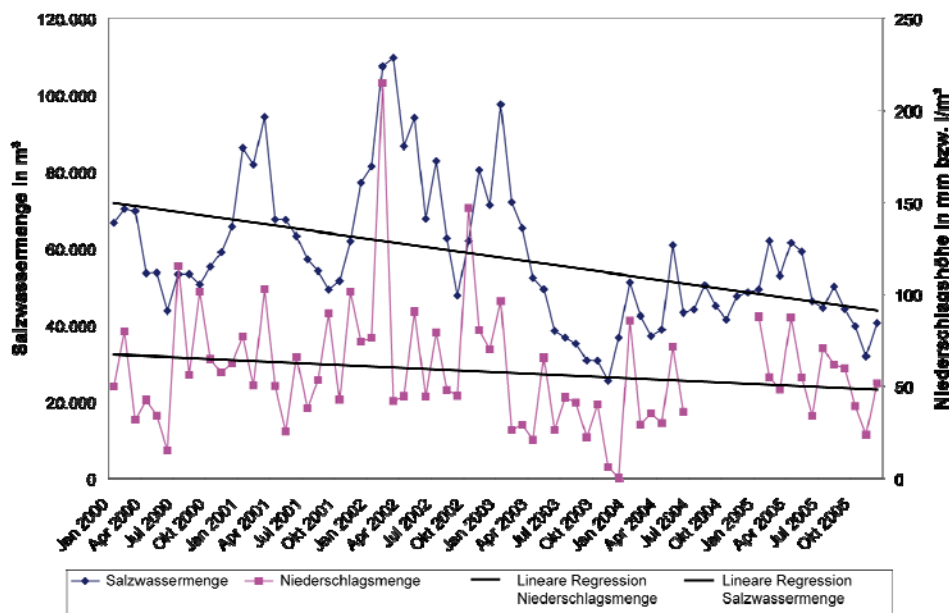


Abbildung 5 Darstellung der Monatsmittelwerte zum Salzwasseranfall im Grabensystem am Fuß der Halde Neuhoof und der am Standort gemessenen Niederschlagsmenge (mit linearer Regression der Monatswerte)

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

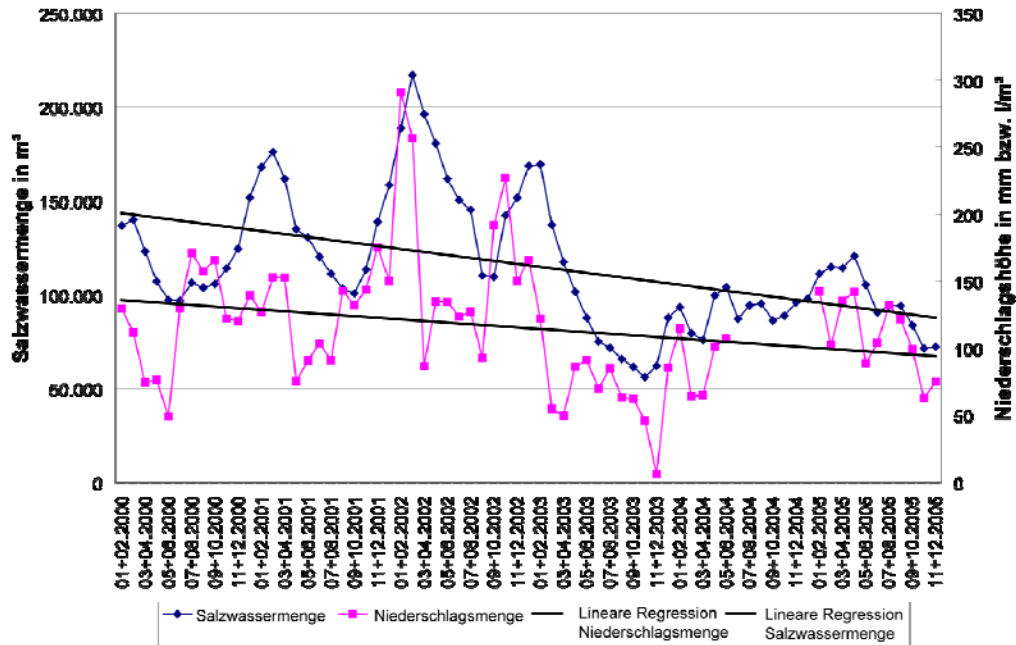


Abbildung 6 Darstellung der 2-Monatsmittelwerte zum Salzwasseranfall im Grabensystem am Fuß der Halde Neuhoof und der am Standort gemessenen Niederschlagsmenge (mit linearer Regression der 2-Monatswerte)

Die vom Werk NE zu entsorgenden Salzwässer werden entsprechend den behördlichen Auflagen^{16, 17, 18} überwacht. Insbesondere im Zusammenhang mit der Planfeststellung für die Haldenerweiterung wurden die vorliegenden chemischen Analysendaten für den Zeitraum 2000 bis 2005 detailliert ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zusammensetzung der Salzwässer jahreszeitlichen und witterungsbedingten Schwankungen unterliegt, die durch folgenden Durchschnitt repräsentiert wird (vgl. Abbildung 7):

| | |
|-------------------|----------|
| KCl | 37 g/l |
| MgCl ₂ | 58 g/l |
| MgSO ₄ | 74 g/l |
| NaCl | 122 g/l |
| Wasser | 919 g/l. |

Die Dichte der Salzwässer liegt bei 1,209 g/cm³. Der Gesamtgehalt an Chlorid beträgt dabei 131 g/l.

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

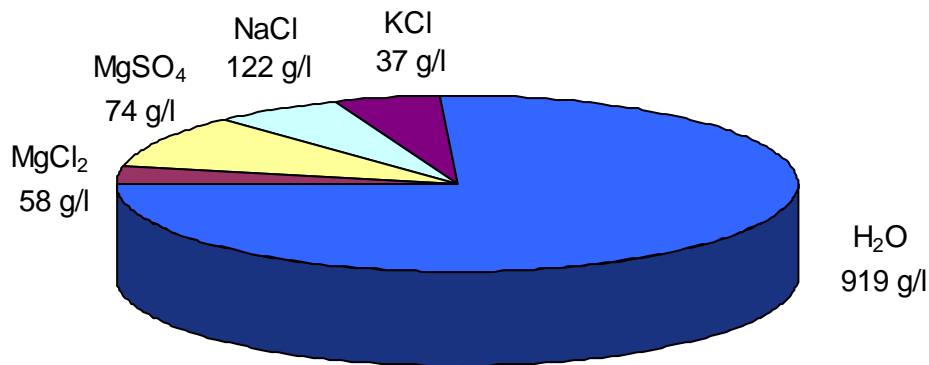


Abbildung 7 Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der im Werk Neuhoof-Ellers anfallenden Salzwässer

Die aufgrund der gestiegenen Produktionskapazität des Werkes NE erforderliche Erweiterung der Rückstandshalde führt zwangsläufig auch zu einer Vergrößerung der Haldenoberfläche, was wiederum dazu führt, dass künftig größere Mengen Niederschlagswässer durch den Haldenkörper zu den Austrittskanälen migrieren, auf diesem Wege weitere Salzfracht aus dem Rückstandsvolumen aufnehmen und in dem am Haldenfuß befindlichen Grabensystem gesammelt werden müssen. Anhand der auf standortspezifischen Erfahrungstatsachen der Halde Neuhoof beruhenden Bilanzrechnungen kann abgeschätzt werden, dass im Werk NE künftig bis zu 400.000 m³ pro Jahr mehr, das heißt in Summe jährlich etwa 1,1 Millionen m³ Salzwässer zur Entsorgung anfallen werden. Aus diesem Jahresdurchschnittswert ergibt sich rechnerisch ein Anfall von zu entsorgenden Salzwässern von 3.014 m³ pro Tag bzw. von 126 m³ pro Stunde. Der in den nachfolgenden Abschnitten angestellten Diskussion einer theoretisch denkbaren Entsorgungsalternative liegen diese Werte zugrunde.

Die im Jahresmittel der vergangenen 6 Jahre angefallenen etwa 700.000 m³ Salzwässer pro Jahr wurden auf der Grundlage entsprechender wasserrechtlicher Erlaubnisse¹⁶ bzw. bergrechtlich zugelassener Betriebspläne¹⁷ mehrheitlich durch Versen-

¹⁶ Regierungspräsidium Kassel (2003): Erlaubnisbescheid zur Versenkung von Salzabwasser in den Plattendolomit, Az: 41.1/Hef 79 f 12-230/001, 8 Seiten, Regierungspräsidium Kassel, Abteilung III - Dezernat 31.1, Bad Hersfeld, 15. Dezember 2003

¹⁷ Regierungspräsidium Kassel (2003): Sonderbetriebsplan über die weitere Versenkung von Salzabwasser in den Plattendolomit, Az: 44/Hef 79 b 06-05-300/146/89, 5 Seiten, Regierungspräsidium Kassel, Abteilung III - Dezernat Bergaufsicht, Bad Hersfeld, 17. Dezember 2003

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

kung in den Kluftspeicher des Plattendolomit (Leine-Folge, Zechstein 3) entsorgt. Lediglich weniger als 5 % der Salzlösungsmenge wurde durch das Flüsschen Fliede in einem kontrollierten Zeit-Mengen-Verhältnis der Vorflut zugeleitet, was ebenfalls durch entsprechende wasserrechtliche Erlaubnisse¹⁸ und bergrechtlich zugelassene Betriebspläne¹⁹ geregelt ist.

Die vom Unternehmen K+S entsprechend der behördlichen Auflagen kontinuierlich betriebene Überwachung der Versenkräume hat gezeigt, dass im Umfeld des Werkes NE keine ausreichenden Kapazitäten an Versenkraum vorhanden sind²⁰. Selbst umfangreiche Erkundungsarbeiten haben keinen Nachweis einer auch für den steigenden Salzwasseranfall hinreichenden Versenkkapazität erbracht²¹.

Der Planfeststellungsbeschluss zur Westerweiterung der Rückstandshalde Neuhof²² fordert mit seinen Nebenbestimmungen (insbesondere Nebenbestimmung 4.2.3.7. ff.) jedoch den sicheren Nachweis ausreichender Versenkkapazität zur Entsorgung der anfallenden Salzwässer für einen Mindestzeitraum von 10 Jahren und legt weiter fest, dass im Falle nicht ausreichender Versenkkapazität das Antragsverfahren für einen alternativen Entsorgungsweg einzuleiten ist.

¹⁸ Regierungspräsidium Kassel (2004): Erlaubnisbescheid für die Gewässerbenutzung, Az: 41.1/Hef 79 f 12-220/001, 7 Seiten, Regierungspräsidium Kassel, Abteilung III - Dezernat 31.1, Bad Hersfeld, 25. November 2004

¹⁹ Regierungspräsidium Kassel (2004): Betriebsplanzulassung Antrag auf Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis zur Einleitung von Abwasser in ein Oberflächengewässer, Az 44/Hef 79 e 302/11/71, 3 Seiten, Regierungspräsidium Kassel, Abteilung III - Dezernat Bergaufsicht, Bad Hersfeld, 25. November 2004

²⁰ K+S KALI GmbH (2000): Abgrenzung des Versenkraumes und Ermittlung des vorhandenen Hohlraumvolumen zur Haldenwasserversenkung im Plattendolomit; 15 Seiten, 2 Anlagen, Kassel, Oktober 2000

²¹ K+S KALI GmbH (2003): Darstellung des zur Verfügung stehenden Versenkohlraumes im Plattendolomit.- Anhang 9, Kassel, Mai 2003, 20 Seiten, 5 Anlagen.- In K+S KALI GmbH (2003): Antrag auf Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis gemäß § 7 Abs. 1 WHG zur Versenkung von Salzabwasser in den Untergrund (Plattendolomit), 3 Seiten, 10 Anhänge mit Anlagen, Neuhof, 14. Juli 2003

²² Regierungspräsidium Kassel (2003): Planfeststellungsbeschluss für die Westerweiterung der Kalirückstandshalde Neuhof der Firma K+S Kali GmbH, Werk Neuhof, Gemeinde Neuhof, Landkreis Fulda, Az: 44/Hef-76 d 40-11-303/28/111, 112 Seiten, Regierungspräsidium Kassel, Abteilung III Bad Hersfeld, Dezernat Bergaufsicht, Bad Hersfeld, 24. April 2003

3 Reduzierung und/oder Entsorgung der im Werk Neuhoof-Ellers anfallenden Salzwässer durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Ausgehend von der im Abschnitt 1 erläuterten Aufgabenstellung und den im vorangestellten Abschnitt 2 abgehandelten standortspezifischen Randbedingungen waren am Beginn der Bearbeitung zunächst alle grundsätzlich denkbaren Entsorgungsalternativen zu identifizieren. Im Folgenden wurden die verfahrenstechnischen Prozesse, die technologischen Voraussetzungen, die erreichbaren Ziele und die Kosten für die Anwendung denkbarer Entsorgungsalternativen im Rahmen einer Konzeptstudie untersucht und analysiert. In einem weiteren Schritt war beabsichtigt, im Falle positiver Ergebnisse zur technischen Machbarkeit und wirtschaftlichen Vertretbarkeit auch die Kombination dieser Entsorgungsmöglichkeit mit anderen Alternativen zur Reduzierung und/oder Entsorgung der im Werk NE anfallenden Salzwässer zu prüfen.

Die nun folgenden Abschnitte fassen die Ergebnisse dieser Untersuchungen für die Alternative

Eindampfen oder Tiefkühlen der Salzwässer

zusammen und bewerten abschließend die technische Machbarkeit dieser beiden, auf Kristallisation beruhenden Entsalzungsverfahren wie auch die wirtschaftlichen Auswirkungen ihrer Realisierung.

Ohne den Ergebnissen der in den nachfolgenden Abschnitten ausführlich diskutierten Prüfung der technischen Machbarkeit vorgreifen zu wollen, erfolgte die Wahl dieser Alternative zunächst in der Erwartung, dass durch die Eindampf- und die Tiefkühlkristallisation die Menge der zu entsorgenden Salzwässer verringert sowie zum Anderen ein verkaufsfähiges Kalium-Magnesium-Salz erzeugt und dadurch ein Deckungsbeitrag zur Finanzierung der aufwendigen Eindampfanlage und ihres Betriebes erreicht werden kann.

Die thermische Eindampfung von Salzlösungen wird seit den Ursprüngen der Kali-Rohsalzverarbeitung genutzt, indem durch die beiden wesentlichen Verfahrensschritte

ERSTER SCHRITT: Vorkonzentration der Lösung durch Erhitzung

und

ZWEITER SCHRITT: Kristallisation aus der vorkonzentrierten Lösung

ein mehr oder minder monomineralisches Kristallinat gewonnen wird.

Dem allgemeinen technologischen Fortschritt folgend, ist auch dieses Verarbeitungsverfahren in den vergangenen 60 Jahren in vielfacher Hinsicht technisch verbessert und dadurch bezüglich des Ausbringens der Wertstoffkomponenten und/oder des erforderlichen Energieeinsatzes effizienter gestaltet worden. Spezifische Eigenschaf-

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

ten der einzudampfenden Lösungen, die maßgeblich durch den Rohstoff - im Wesentlichen durch die Zusammensetzung der bergmännisch gewonnenen Rohsalze bzw. der natürlichen Mineralsalzlösungen - bestimmt werden, oder auch spezielle Produktanforderungen sowie Aspekte eines rationellen Energieeinsatzes erfordern jedoch in jedem Einzelfall eine Anpassung des Eindampfungsverfahrens und der dafür verwendeten maschinentechnischen Ausrüstungen. Die verfahrenstechnische Auslegung einer solchen Lösungsverarbeitung erfordert daher die Kenntnis einer Reihe von Parametern, die gewöhnlich in Labor- und/oder Technikumversuchen ermittelt werden.

Um die Möglichkeiten einer Reduzierung der am Standort NE zur Entsorgung anfallenden Salzwässer durch eine Eindampfungskristallisation zu prüfen, sollen zunächst die Ergebnisse von phasentheoretischen Betrachtungen sowie der bereits durchgeführten Laborversuche zur Eindampfung dieser Salzwässer diskutiert werden. Anschließend werden die daraus abzuleitenden Parameter für die verfahrenstechnische Auslegung analysiert und ein Verfahrensvorschlag für die großtechnische Umsetzung entwickelt. Nachfolgend werden technologische Konzepte für den Einsatz von alternativen Energieträgern bzw. einer alternativen Energieerzeugung betrachtet und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit am Standort des Werkes NE bewertet. In analoger Weise wird daran anschließend auch die Anwendung der Tiefkühlkristallisation als Möglichkeit einer Reduzierung der am Standort NE zur Entsorgung anfallenden Salzwässer geprüft.

Ausgehend von diesen Ergebnissen erfolgt eine zusammenfassende Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeiten einer Eindampfungs- und/oder Tiefkühlkristallisation der im Werk NE anfallenden Salzwässer unter Einsatz der alternativen Energiequellen und die Bewertung der Verkaufsfähigkeit der anfallenden Produkte.

3.1 Ergebnisse von phasentheoretischen und Laboruntersuchungen zur Eindampfung der zur Entsorgung im Werk NE anfallenden Salzwässer

Zur Untersuchung der technischen Voraussetzungen für eine Eindampfung der zur Entsorgung im Werk NE anfallenden Salzwässer wurden theoretische²³ sowie La-

²³ Wambach-Sommerhoff, K. R. (2006): „Phasentheoretische Betrachtungen zur Eindampfung von Halden- und Versenklösungen (NE)“, Heringen, 16. Februar 2006

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

boruntersuchungen²⁴ durchgeführt, deren Ergebnisse im ANHANG A zusammengefasst sind.

Zur Darstellung der Zusammensetzung der untersuchten Lösungen sowie ihrer Gleichgewichtsbeziehungen zu festen Mineralphasen im quinären System der ozeanischen Salze wurden die Analysenwerte zunächst in JÄNECKE-Einheiten umgerechnet und im JÄNECKE-Diagramm dargestellt (Abbildung 8).

Der Prozessablauf der sukzessiven Eindampfung der Lösung ohne zwischenzeitliche Entnahme von Bodenkörpern ist im Diagramm als Entwicklungspfad dargestellt. Der Durchgang des Entwicklungspfades durch die einzelnen Stabilitätsfelder der festen Phasen zeigt die zeitlich aufeinander folgende Entwicklung der verschiedenen Bodenkörper im Gleichgewicht an.

Aus den theoretischen Betrachtungen unter der Annahme des Vorliegens von Lösungsgleichgewichten lässt sich folgender grundsätzlicher Eindampfungsverlauf ableiten, der für den Fall gilt, dass keine zwischenzeitliche Entnahme von Bodenkörpern erfolgt²³.

²⁴ Jetzki, M. (2007): Interne Notiz zum Vorgang: Eindampfversuche zur Verwertung von Versenkölösung ex NE, 2 Seiten, Heringen 30.03.2007

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Halit gesättigtes quinäres System

(Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-})

bei 90 °C nach Jänecke

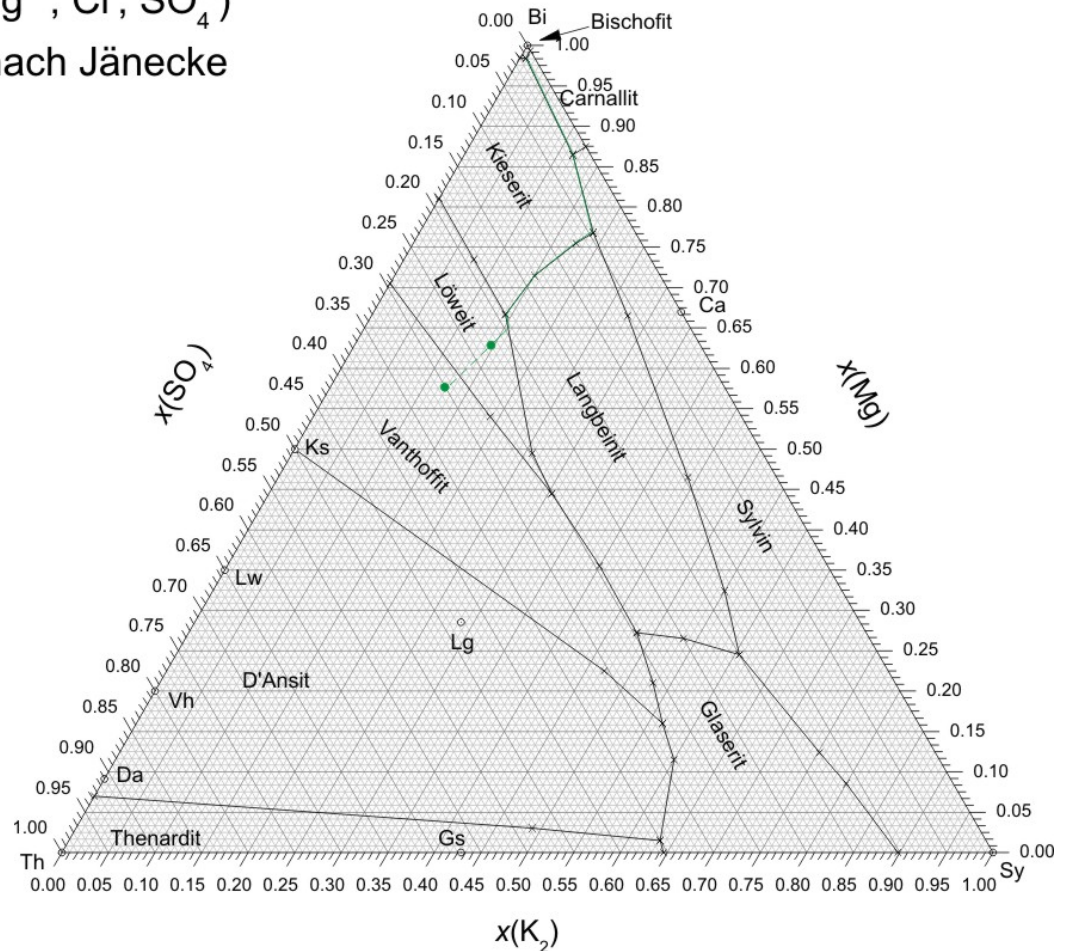


Abbildung 8 Veranschaulichung der chemischen Zusammensetzung der zur Entsorgung anfallenden Lösung und Darstellung ihrer Gleichgewichtsbeziehungen zu festen Mineralphasen im quinären System der ozeanischen Salze nach JÄNECKE im Zuge einer sukzessiven isothermen Eindampfung bei 90°C

Nach Entfernung von etwa einem Viertel des enthaltenen Wassers tritt als erster Bodenkörper Löweit²⁵ auf. Ab einem Eindampfgrad von etwa 43 % setzt zusätzlich Halit-Sättigung ein. Ab 53 % Eindampfgrad setzt ferner Langbeinit²⁶-Sättigung ein wobei allmählich ein Teil des Löweits aufgezehrt wird. Ab einem Eindampfungsgrad von 56 % setzt zusätzlich zur vorhandenen Halit- und Langbeinit-Sättigung auch Kieselit-Sättigung unter allmählicher Aufzehrung des Löweits ein. Bis zu einem Eindampf-

²⁵ Löweit $\text{Na}_{12}\text{Mg}_7[\text{SO}_4]_{13} \cdot 15 \text{H}_2\text{O}$

²⁶ Langbeinit $2 \text{MgSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4$

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

grad von 81 % liegt gleichzeitige Halit-, Langbeinit- und Kieserit-Sättigung mit den entsprechenden Bodenkörpern vor. Bis zu einem Eindampfgrad von 86 % tritt zusätzlich Sylvinit-Sättigung ein, dessen Bildung unter vollständiger Aufzehrung des Langbeinit erfolgt. Stabile Bodenkörper sind dann Halit, Kieserit und Sylvinit. Bei weiterer Eindampfung entsteht bis zu einem Eindampfgrad von 92 % Carnallit²⁷ unter Aufzehrung des Sylvinits. An diesem Punkt sind von der ursprünglichen Lösungsmenge noch 2,1 % vorhanden. Die vollständige Eindampfung führt schließlich zur Bildung eines Kristallisatgemisches bestehend aus Halit, Kieserit, Carnallit und Bischofit in den nachfolgend bezeichneten Mengen (Abbildung 9):

34 % Halit
24 % Kieserit
36 % Carnallit
6 % Bischofit

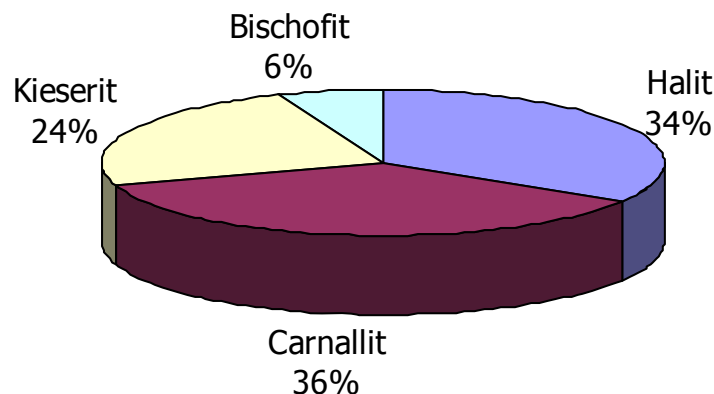


Abbildung 9 Phasenbestand des Bodenkörpers bei vollständiger Eindampfung der zur Entsorgung im Werk Neuhof-Ellers anfallenden Salzwässer

In praktischen Untersuchungen wurde diese Kristallisationsabfolge im Wesentlichen bestätigt²⁴. Die Bildung von Kieserit ist bei der betrachteten Eindampf-temperatur deutlich verzögert, so dass Langbeinit metastabil verbleibt und nur nach verhältnismäßig langen Rührzeiten die Umbildung in den stabilen Kieserit erfolgt. Das dabei erhaltene Kristallisatgemisch erwies sich als hochviskose, zähe Masse, die schon im Labor schwer zu handhaben war und großtechnisch zu beträchtlichen Schwierigkeiten führen dürfte.

²⁷ Carnallit $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$

3.2 Technologisches Konzept für die vollständige thermische Eindampfung der im Werk Neuhoof-Ellers zur Entsorgung anfallenden Salzwässer

Der großtechnischen Umsetzung der Eindampfung der im Werk NE zur Entsorgung anfallenden Salzwässer liegen folgende technologische und anlagentechnische Auslegungsgrundsätze zugrunde:

Bei einer möglichen Betriebszeit von 7.200 h/a und einer Salzwassermenge von 1.100.000 m³/a berechnet sich ein Anlagendurchsatz auf etwa 153 m³/h.

Die Anlage wäre wärmetechnisch mehrstufig, kombiniert auszuführen. Dabei kann mit einem spezifischen Dampfverbrauch von ca. 0,24 t Dampf/t Brüden gerechnet werden.

Zur vollständigen Eindampfung bei 90°C müssen aus der zugeführten Lösung 130 t/h Brüden ausgedampft werden, wofür ungefähr 33 t/h Heizdampf bei einem Druck von 8...10 bar benötigt werden. Das entspricht einem jährlichen Bedarf von etwa 238.000 t Heizdampf.

Im Ergebnis werden etwa 55 t/h **Kristallisat** der unter Abschnitt 3.1 genannten Zusammensetzung erhalten, das nicht verwertbar ist.

Bei einer Aufarbeitung des Kristallisates, das einem wertstoffarmen Carnallit²⁸ entspricht, entsteht bei geringer KCl-Gewinnung und unter Anfall hoher fester Rückstandsmengen wiederum eine Restlösung, die das MgCl₂ nahezu vollständig und KCl, NaCl und MgSO₄ zum Teil enthält. Im Ergebnis fallen aus der zu entsorgenden Lösung wiederum erhebliche Mengen Abfalllösungen und aufzuhaltende Rückstandsmengen an.

3.3 Technologisches Konzept für die teilweise thermische Eindampfung der im Werk Neuhoof-Ellers zur Entsorgung anfallenden Salzwässer

Wegen des hohen Bedarfs an Heizdampf für eine vollständige Eindampfung wurden auch weitere Verarbeitungsalternativen mit nur teilweiser Eindampfung untersucht. Allerdings zeigt schon das JÄNECKE-Diagramm (Abbildung 8), dass keine besser verwertbaren Bodenkörper zu erwarten sind und darüber hinaus auch eine größere

²⁸ Carnallit ist ein Kalisalzgestein, dessen maßgebliche Wertstoffkomponente das Kalium-Magnesium-Mineral Carnallit ist. Das Kalium-Magnesium-Mineral Carnallit ($\text{KCl} \times \text{MgCl}_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}$) enthält 16,9 Masse-% der Wertstoffkomponente K₂O. Seine MgCl₂- und Kristallwasser-Anteile sind die maßgebliche Ursache für den Anfall der Fabrikendlaugen beim Verarbeitungsprozess.

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Menge mehr oder weniger konzentrierter Restlösungen zur Entsorgung anfallen würde. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, ergeben sich auch praktisch keine Ansatzpunkte zur Gewinnung verwertbarer Kristallisate mit teilweiser Eindampfung.

Eine wegen des geringen Wertstoffinhaltes betriebene Entsorgung der Eindampfprodukte, z. B. auf der Rückstandshalde Neuhoof verbietet sich aufgrund der vorab verbrauchten Ressourcen *a priori*, würde dies doch vor allem eine Energievernichtung bedeuten.

3.4 Technologisches Konzept für das Tiefkühlen der im Werk Neuhoof-Ellers zur Entsorgung anfallenden Salzwässer

Das Behandeln von Lösungen in der Kaliindustrie in Temperaturbereichen unterhalb der Umgebungstemperatur ist seit längerem bekannt, es war wegen der veränderten Löslichkeiten und der darstellbaren Bodenkörper (z.B. Hydrate des MgSO_4 bzw. des Na_2SO_4) durchaus von Interesse, allerdings im Wesentlichen auf die Herstellung technischer Salze beschränkt.

Der hohe Energieeinsatz für die Kälteerzeugung, die Problematik der Verkrustungen der Überträgerflächen der Apparaturen bei direktem Wärmeübergang, die sehr niedrigen anzuwendenden Drücke von nur wenigen Torr bei der indirekten Wärmeübertragung (Verdampfungskühlung), die hohen Verluste beim direkten Einsatz verflüssigter Kohlenwasserstoffe u. a. haben dazu geführt, dass Anwendungen der Tiefkühlung tatsächlich nur produktbezogen waren und für hohe Flüssigkeitsdurchsätze lange Zeit nicht Betracht kamen.

Einen Durchbruch in Bezug auf die KCl-Gewinnung aus Abstoßlösungen gab es erst in den Jahren 1984 bis 1986, als eine Anlage im ehemaligen Kaliwerk Merkers entwickelt, errichtet und betrieben wurde, die auf einem innovativen Konzept der Wärmeübertragung und Kristallisation beruhte. Dabei wurde die Lösungskühlung in liegenden Rohrbündelwärmeübertragern vorgenommen, die von der zu kühlenden Salzsuspension in den Rohren durchströmt wurden und davon apparativ getrennt die Kristallisation in so genannten „Einheitsreaktoren“ betrieben, die eine Kombination aus Rührbehälter und Kläreinrichtung darstellten. Durch mehrstufige Anordnung der Kombination Wärmeüberträger/Einheitsreaktor gelang eine hinreichende Ausnutzung der zugeführten Kälteenergie und durch gleichzeitige Anwendung großer Lösungsumläufe eine Begrenzung der Temperaturdifferenzen in jedem Wärmeübertrager auf unkritische Werte in Bezug auf die Verkrustungen.

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

3.4.1 Erfahrungstatsachen für den Einsatz der Tiefkühlung von konzentrierten Salzlösungen und Salzwässern in der Kaliindustrie am Beispiel des ehemaligen Kaliwerkes Merkers

In der vierstufigen großtechnischen Referenzanlage (Abbildung 10) wurden Lösungsdurchsätze von 290...340 m³/h (Φ ca. 295 m³/h) gefahren und dabei eine Abkühlung der Abstoßlösung im Mittel von 27°C auf 2°C erreicht. Dabei wurde die Zusammensetzung der Lösung wie folgt verändert:

Tabelle 1 Lösungszusammensetzung für die Referenzanlage im Kaliwerk Merkers

| | Abstoßlösung | Gekühlte Lösung |
|-------------------|--------------|-----------------|
| KCl | 59 g/l | 40 g/l |
| NaCl | 50 g/l | 43 g/l |
| MgCl ₂ | 267 g/l | 271 g/l |
| MgSO ₄ | 40 g/l | 38 g/l |
| H ₂ O | 864 g/l | 875 g/l |
| Dichte | 1280 g/l | 1267 g/l |

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer durch Eindampfen

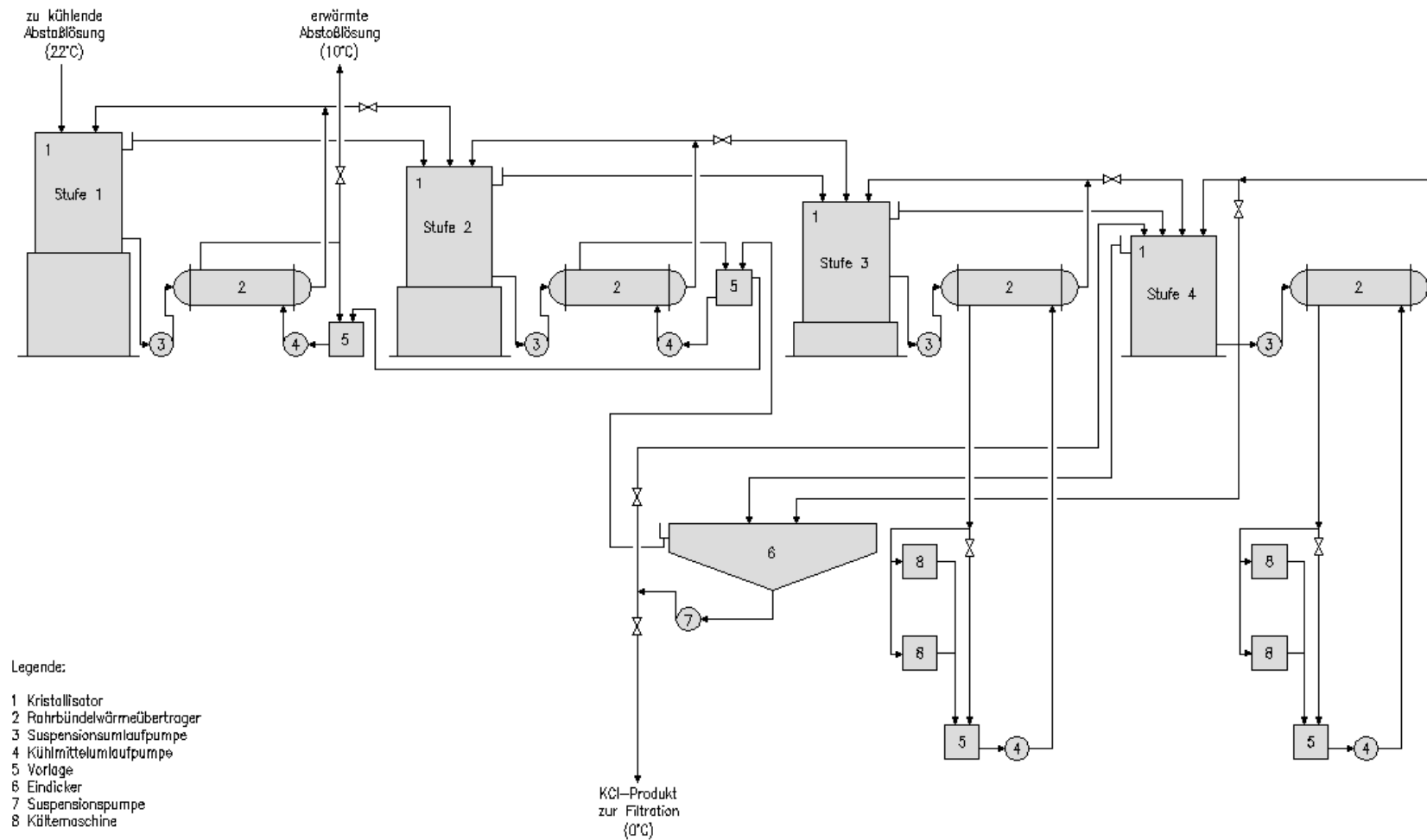


Abbildung 10 Tiefkühlanlage für Salzwässer und -lösungen

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Durch die Kühlung und Kristallisation wurden damit ca. 19 kg/m^3 KCl als Kristallisat gewonnen, wobei nebenbei auch NaCl und zeitweise Bittersalz ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) mit kristallisiert wurden, so dass die eigentliche KCl-Ausbeute noch um die Deckverluste reduziert war.

Der Prozess wurde bis zur Stilllegung der Verarbeitungsanlagen erfolgreich betrieben. Allerdings sind aus dem Dauerbetrieb der Anlage durchaus noch Verbesserungspotenziale abzuleiten:

Verbesserung des Übersättigungsabbaus für KCl
(Es wurden in der gekühlten Lösung bis zu 30 % Restübersättigung an KCl analysiert.)

Insbesondere im Winterbetrieb traten zeitweise erhebliche Mengen an Bittersalz im Kristallisat auf, die ihrerseits den Übersättigungsabbau für KCl wegen fehlender Kristalloberflächen beeinträchtigten.

Die Anlage war nur auf die Gewinnung von KCl ausgerichtet, obwohl das Bittersalz durchaus als Wertstoff zu betrachten ist, war sein Auftreten in diesem Sinne eher hinderlich. Für eine weiterentwickelte Anlage sollten daher auch die separate Gewinnung von Bittersalz und die Umsetzung zu Kaliumsulfat geprüft werden.

Mit verbesserten Kältemaschinen und Kältemitteln könnten wohl auch noch tiefere Abkühltemperaturen erreicht werden.

3.4.2 Anwendung der Tiefkühlkristallisation zur Entsorgung der anfallenden Salzwässer des Werkes Neuhof-Ellers

Die zur Entsorgung anfallenden Salzwässer des Werkes NE weisen eine sehr geringe KCl-Sättigung um 30 % gegenüber einer gleichzeitig an Halit und Sylvin gesättigten Gleichgewichtslösung bei 22°C auf. Bei Tiefkühlung auf 0°C wird diese KCl-Sättigung gerade einmal auf ca. 40-50 % erhöht, an eine KCl-Kristallisation ist auf diesem Wege überhaupt nicht zu denken.

Auch die mögliche Gewinnung von Sulfaten aus den zur Entsorgung anfallenden Salzwässern des Werkes NE durch Tiefkühlung ist wegen des vergleichsweise niedrigen MgCl_2 -Gehaltes problematisch. Falls Sulfate gewonnen werden können, fallen diese als Glaubersalz ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$) an, das für eine technische Nutzung vordergründig eher nicht in Betracht kommt.

3.5 Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten für die Prozessstufe der Eindampfkristallisation durch konventionelle Heizdampferzeugung auf der Basis von Primärenergieträgern

Wie in den vorangestellten Abschnitten gezeigt wurde, führen weder die fraktionierte thermische Kristallisation (vgl. Abschnitt 3.3) noch die Tiefkühlkristallisation (vgl. Abschnitt 3.4) zu verwertbaren Kristallisatprodukten. Allein im Ergebnis einer vollständigen thermischen Eindampfkristallisation ist ein minderwertiges, mit qualitativ schlechten Kalirohsalzen vergleichbares Kristallisat zu erwarten (vgl. Abschnitt 3.2). Deshalb sollen die erforderlichen Investitions- und Betriebskosten allein für diese Möglichkeit zur Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers zur Entsorgung anfallenden Salzwässer näher untersucht werden.

Zur wirtschaftlichen Bewertung des bei der **Volleindampfung** anfallenden Kristallisats wird nachfolgender, überschlägiger Kostenvergleich angestellt:

Für die Erzeugung von 55 t/h Eindampfkristallisat werden mindestens 33 t/h Heizdampf benötigt. Bei

- einem Verrechnungspreis (Basis Primärenergie) von 14,43 EURO/t Heizdampf,
- einer geschätzten Investitionskostensumme für die Eindampfanlage von 27 Millionen EURO,
- einem Abschreibungssatz von 10 %/a,
- Personalkosten von 45.000 EURO/AK a und 12 AK im Vierschichtsystem

berechnen sich günstigstenfalls:

| | |
|--|-----------------------|
| Belastung an Energiekosten ²⁹ von | 3.429 T EURO/a (43 %) |
| Belastung an Abschreibungen von | 2.700 T EURO/a (34 %) |
| Belastungen an Personalkosten von | 540 T EURO/a (7 %) |
| Sonstige Belastungen (Reparaturkosten) von | 1.350 T EURO/a (16 %) |
| <u>Summe der Kostenbelastung</u> | <u>8.019 T EURO/a</u> |

Bei einem K₂O-Gehalt des Kristallisates von 6,2 % ergibt sich eine Kostenbelastung von ca. 326,60 EURO/t K₂O. Dabei handelt es sich nur um die Kostenvorbelastung

²⁹ nur Berücksichtigung des Energieaufwandes zur Heizdampferzeugung

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

des Kristallisates, eine Aufbereitung zu K 60 erfordert weitere wesentliche Aufwendungen.

Stellt man dieser Kostenbetrachtung einen erzielbaren Preis für K 60-Produkt von etwa 196 EURO/t K_2O gegenüber, erübrigt sich jedoch jede weitere Spekulation zur Verwertung des Eindampfkristallisates, auch wenn man eine gewisse Kostenentlastung durch mögliche Nebenprodukte berücksichtigt.

Wie für jeden thermischen Eindampfprozess zu erwarten ist, zeigt die Kostenaufstellung auch für das hier gewählte Konzept, dass die maßgeblichen Aufwendungen - im vorgestellten Fall fast 65 % - zur Deckung des Energiebedarfs erforderlich sind. Die Suche nach Möglichkeiten, diesen Kostenanteil, z. B. durch Nutzung alternativer Energieträger und/oder -erzeugung signifikant zu reduzieren, erscheint daher folgerichtig.

3.6 Möglichkeiten für den Einsatz alternativer Energieträger und/oder -erzeugung bei der Eindampfung von Salzwässern am Standort Neuhof-Ellers

Die theoretischen Grundlagen und praktischen Anwendungskonzepte sowie ausgewählte Referenzen zum Einsatz alternativer Energieträger und/oder -erzeugung in Mitteleuropa werden, soweit sie für die hier zur Rede stehende Aufgabenstellung bedeutsam sind, ausführlich in ANHANG B erläutert.

Aus dem Spektrum alternativer Energieträger und/oder -erzeugung wurden folgende theoretisch denkbare Möglichkeiten untersucht:

- Nutzung von Solarenergie auf der Rückstandshalde NE
- Nutzung von Windenergie
- Nutzung geothermischer Energieressourcen

In den folgenden Abschnitten werden in dieser Reihenfolge allein die Ergebnisse der Eignungsprüfung aufgeführt und diskutiert. Bezüglich der zugrunde liegenden Eingangsdaten und Referenzen wird auf ANHANG B verwiesen.

Technische Machbarkeit einer solartechnischen Energieerzeugung auf der Rückstandshalde Neuhof

Wie bereits in Abschnitt 2.3 ausführlich behandelt wurde, ist der einige Dezimeter bis über einen Meter mächtige Auflockerungsbereich an der Oberfläche des Haldenkörpers als Baugrund nicht geeignet, da er aufgrund der fortdauernden Lösungsprozes-

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

se und den damit verbundenen relativ starken Bodenbewegungen bzw. -veränderungen im Mikrorelief nicht belastbar ist. Jede Art der Befestigung und/oder Gründung in diesem verkarsteten Oberflächenbereich des Haldenkörpers birgt daher erhebliche Gefahren für die zu befestigenden Ausrüstungen. Im Falle einer Ablösung von Ausrüstungsteilen kann dadurch auch die Öffentliche Sicherheit im Umfeld des Haldenkörpers beeinträchtigt werden.

Hinsichtlich der Befestigung der Solarmodule gilt dieser Umstand grundsätzlich für den gesamten Haldenkörper, besonders jedoch für die steilen Böschungsflanken. Für eine photovoltaische Energieerzeugung kommen auf der Rückstandshalde Neuhof daher nur solche Abschnitte in Frage, wo

- (i) ein Abtrag bzw. die Verdichtung der oberflächennahen Auflockerungszone

und

- (ii) eine sichere Verankerung der Solarzellen

möglich sind. Die großflächigen steilen Böschungen an der Peripherie der Halde Neuhof, insbesondere in den Südhang-Lagen, genügen diesen Ansprüchen nicht. Allein das subhorizontale südöstliche Haldenplateau könnte diese Voraussetzungen erfüllen, womit eine Fläche von etwa 30.000 m² zur Installation zur Verfügung stehen könnte.

Um die Erosion und/oder Auflösung der Befestigungsfundamente zu verhindern, müsste jedes der Solarmodule mit einer Regenabflussrinne und einem geeigneten Abflusssystem ausgestattet werden. Die Installation und Wartung dieser Drainagesysteme für die Niederschläge würde zusätzlich zu den relativ hohen Ausrüstungskosten der Solarzellen weitere finanzielle Belastungen verursachen, die in den folgenden Kostenabschätzungen aber nicht näher berücksichtigt werden.

Für das Verdampfen der Salzwässer werden gemäß Abschnitt 3.2 jährlich 238.000 t Dampf mit 8 bis 10 bar Betriebsdruck benötigt. Dies entspricht einer jährlichen Leistung von etwa 170 000 MWh³⁰.

Um diese Leistung am Standort NE mit Hilfe von Solarzellen zu erzeugen, wäre je nach Modul³¹ eine überschlägig abgeschätzte photovoltaische Nutzfläche von 1,9 - 2,4 km² nötig, was etwa zwischen 3,8 und 4,8 km² Installationsfläche bedarf. Die abgeschätzte Installationsfläche wäre demnach einige Hundert Mal (130- bis 160-fach) größer, als die am südöstlichen Haldenplateau zur Verfügung stehende Fläche³².

³⁰ unter Annahme eines elektrischen Wirkungsgrades von 0,85

³¹ bei 70-90 kWh/m² Modulfläche

³² Um zu verdeutlichen, wie groß die benötigte Fläche an Solarmodulen ist, wird hier ein Vergleich mit einem üblichen Fußballfeld von ca. 7.150 m² herangezogen: allein die benötigte Solarzellenfläche

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Unabhängig von der fehlenden Fläche würden auch die Energiekosten durch den Einsatz von unsubventioniertem Solarstrom entsprechend stark ansteigen (Tabelle 1). Ohne näher auf eine detaillierte Berechnung einzugehen, muss jedoch angemerkt werden, dass bei dieser Abschätzung des Leistungsbedarfs Verluste durch Energiespeicherung und/oder Umwandlung nicht explizit und bei den Dampfkosten auch keine Abschreibungen für Investitionen berücksichtigt wurden.

Tabelle 1 Gegenüberstellung der abgeschätzten Kosten für die Dampferzeugung aus Gas und durch elektrische Energie aus der Solarzelle

| | Wärme aus Gas | Strom aus Solarzelle |
|---|---------------|----------------------|
| Kosten [Cent/kWh] | 1,9 | 37-50 |
| Wirkungsgrad | 0,92 | 0,85 |
| Kosten für eine Tonne Dampf [EURO/t] | 14,43 | 300- 420 |
| Jährliche Dampfkosten [EURO ³³] | ca. 3.429.000 | ca. 102.000.000 |

Aufgrund des erheblichen Flächenbedarfs für die Installation der Solaranlagen kann eine Nutzung solarer Energieerzeugung für die Bereitstellung der zur Dampferzeugung notwendigen Energie nicht in Frage kommen.

Technische Machbarkeit einer Nutzung von Windenergie auf der Rückstandshalde Neuhof

Die Hochlagen wie auch die damit verbundene räumliche Exposition von Rückstandshalden der Kaliindustrie scheinen die Nutzung der erneuerbaren Windenergie geradezu herauszufordern, weshalb bereits anderenorts Überlegungen zur Installation von Windkraftanlagen auf stillgelegten Kali-Althalden angestellt wurden. Geht es jedoch darum, den gesamten Energiebedarf für die Eindampfung der zur Entsorgung im Werk NE anfallenden Salzlösungen durch Windkraftanlagen zu decken, zeigen die überschlägigen Kalkulationen zur Auslegung des Anlagenparks ein ähnliches Bild wie für die Nutzung von Solarzellen:

Für drei unterschiedlich ausgelegte Windkraftanlagen deutscher Fabrikation sind die Leistungsdaten in Tabelle 2 aufgeführt und für den jährlichen Ertrag

würde etwa 300 Fußballfeldern entsprechen. Die Installationsfläche sollte annähernd doppelt so groß wie die Solarzellenfläche sein, was dann etwa 600 Fußballfeldern entspräche.

³³ abgeschätzt anhand üblicher, unsubventionierter Solarstrompreise (vgl. ANHANG B) für jährlich 238.000 Tonnen Dampf; ohne Abschreibungen für Investitionen

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

einer zur Erzeugung von Dampf benötigten Leistung von 170.000 MWh³⁰ hochgerechnet. Entsprechend der in Tabelle 2 dargestellten Spezifikationen wurde die erforderliche Aufstellungsfläche durch ein lineares *scale-up* ermittelt.

Im Ergebnis zeigt sich erneut, dass die zur Errichtung der Windkraftanlagen zur Verfügung stehende Fläche des südöstlichen Haldenplateaus mit etwa 30.000 m² um Größenordnungen zu gering ist, um eine ausreichende Anzahl von Windenergiekonvertern zu installieren. Bei diesen überschlägigen Kalkulationen des Flächenbedarfes wurden

- die gegenüber den Küstengebieten geringere Windgeschwindigkeit auf der Halde Neuhof

und

- die aufgrund der höheren Oberflächenrauigkeit des Haldenkörpers gegenüber den Wasserflächen höheren Reibungsverluste

unberücksichtigt gelassen.

Für die standsichere Verankerung der Windkraftanlagen und den dynamischen Lastabtrag sind auf dem Haldenkörper Tiefgründungen bis zum kompakten Haldenkern erforderlich.

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Tabelle 2 Beispiele für Windkraftanlagen in Deutschland^{34, 35}

| | Windenergiekonverter MONOPTEROS 50 – Wilhelmshaven | Windenergiekonverter AEOLUS II - Wilhelmshaven | Windenergiepark Westküste Nörd- lich der Elbmün- dung im Kaiser- Wilhelm -Koog |
|--|---|---|--|
| Anlagentyp | drei Einblatt- Windturbinen | ein zweiflügeliger Wind- energiekonverter | 36 Windgeneratoren |
| Nennleistung | 2 MW | 3 MW (ab Windstärke 7) | 2,4 MW |
| Jährliche elektrische Leistung | 4.000 MWh | 9.000 MWh | 3.800 MWh |
| Flächenbedarf | ca. 2 ha* | ca. 0,5 ha* | 20 ha |
| <i>Scale-Up</i> für die Ver- dampfung der Halden- lösung | ca. 43 Anlagen diesen Typs wären für die Er- zeugung der notwendi- gen Energie nötig | ca. 19 Anlagen diesen Typs wären für die Erzeu- gung der notwendigen Energie nötig | ca. 45 Anlagen die- sen Typs wären für die Erzeugung der notwendigen Ener- gie nötig |
| Überschlägig abges- chätzte Installations- fläche | ca. 84 ha | ca. 19 ha | ca. 900 ha |

* Der Mindestabstand ist gleich dem fünffachen Rotordurchmesser

Eine wesentliche Einschränkung für die Nutzung der Windenergie ist deren Verfüg-
barkeit. Im Inland laufen die Windenergiekonverter an etwa 2.000 Betriebsstunden
pro Jahr, in Küstenbereichen werden bis zu 3.000 effektive Betriebsstunden erreicht.
Die Anlage zur Eindampfung der Salzwässer ist auf eine durchschnittliche jährliche
Betriebszeit von 7.200 Stunden ausgelegt, da die Kristallisatoren bei häufiger Be-
triebsunterbrechung Schaden nehmen können und die Anlage somit möglichst konti-
nuierlich laufen muss. Die Windkraftanlagen könnten im günstigsten Fall etwa 40 %
dieser Zeit abdecken, weshalb zusätzliche Quellen zur Energieerzeugung notwendig
wären.

³⁴ Kasang, D. (2004): Windenergie.- Hamburger Bildungsserver.-<http://lbs.hh.schule.de>, 2004

³⁵ Bundesverband Windenergie e.V. (2006): Das Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG),
03. November 2006

Wegen des erheblichen Flächenbedarfs für die Installation der Windkraftanlagen und deren zu geringer Verfügbarkeit im Jahresverlauf kann eine Nutzung der Windenergie für die Bereitstellung der zur Dampferzeugung notwendigen Energie ebenfalls nicht in Frage kommen.

Technische Machbarkeit einer geothermischen Energieerzeugung im Umfeld des Standortes Neuhoof-Ellers

Mehr noch als die beiden anderen untersuchten Alternativquellen für die Energieerzeugung ist das Potenzial zur Nutzung geothermischer Energie von standortspezifischen Faktoren kontrolliert.

Standortuntersuchungen für das Bundesland Hessen³⁶ zeigen keine anomalen geothermischen Potenziale auf, wie sie etwa aus dem südlichen Oberrhein-Graben, um Bad Urach oder aus den jungen Vulkangebieten der Auvergne/Frankreich bekannt sind. Unter der Annahme einer mittleren Untergrundtemperatur von 10 °C in 20 m Tiefe und einem mittleren geothermischen Gradienten von 3°C pro 100 m dürfte im flacheren Untergrund des Standortes NE eine Temperatur von etwa 13°C (in etwa 120 m Tiefe) bis 20°C (in etwa 350 m Tiefe) vorherrschen.

In solchen Tiefen sind allenfalls geringe Beiträge zur Wärmeversorgung von Haushalten durch Erdwärmepumpen bis 30 kW möglich, nicht aber eine Erzeugung der zur Eindampfung der im Werk NE anfallenden Salzwässer benötigten Heizdampfmen gen.

Für eine derartige Aufgabe können allein die geothermischen Potenziale größerer Tiefen genutzt werden:

In Abbildung 11 ist die Temperaturverteilung im Untergrund Deutschlands für 1.000 m, 2.000 m und 3.000 m Tiefe dargestellt³⁷. Darin ist zu erkennen, dass die Erdkruste im weiteren Umfeld des Werkes NE in 1.000 m Tiefe eine Temperatur von 35°C bis 40°C aufweist, was für die unmittelbare Dampferzeugung ebenfalls noch keine Anwendung bietet. Erst in einer Tiefe von 2.000 m werden etwa 100°C erreicht, wodurch theoretisch eine wirtschaftliche Energienutzung nach dem Hot-Dry-Rock-Verfahren (HDR) möglich wäre.

Das HDR-Verfahren gilt heute jedoch nicht hinreichend technisch erprobt. Um dieses Verfahren für die hier zur Rede stehenden Aufgaben anzuwenden, wären folglich weitere Untersuchungen zu den Standortgegebenheiten und technologische Entwicklungen durchzuführen. Unabhängig davon, dass dieses Verfahren heute noch nicht

³⁶ vgl. auch: Rumohr, S. & Fritsche, J.-G. (2005): Erdwärmennutzung in Hessen, Leitfaden für Erdwärmepumpen (Erdwärmesonden) mit einer Heizleistung bis 30kW.- Hrsg.: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2. überarbeitete Auflage, Wiesbaden, 2005

³⁷ Schellschmidt, R. (2005): Karten des Temperaturfeldes im Untergrund Deutschlands .- <http://www.gga-hannover.de>

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

den Stand der Technik repräsentiert, bestehen aus bergbausicherheitlichen Gründen derzeit grundlegende Zweifel an einer Nutzung des HDR-Verfahrens in Regionen mit aktivem Gewinnungsbergbau:

Wie das seismische Ereignis am 08. Dezember 2006³⁸ im Großraum Basel/Schweiz mit einer Lokalmagnitude $M_L = 3,4$ belegt, treten im Zusammenhang mit der für das HDR-Verfahren erforderlichen Stimulierung der Bruchausbreitung flüssigkeitsinduzierte Versagensfälle mit erheblicher Energieabstrahlung auf. Seismologische Prognosen schließen Lokalmagnituden bis $M_L = 4,0$ nicht aus. Eine Nutzung im Umfeld aktiver Gewinnungsbergwerke, insbesondere solchen mit carnallitischen Tragelementen, könnte aufgrund der mit dem seismischen Ereignis verbundenen dynamischen Beanspruchung der Tragelemente unter Umständen die Sicherheit des Bergwerkes und der dort tätigen Belegschaft beeinträchtigen.

Als einzige effiziente Methode für eine geothermische Energieerzeugung zur Bereitstellung hinreichender Dampfmengen könnte sich am Standort NE das HDR-Verfahren in Tiefen um 2.000 m erweisen. Dieses Verfahren stellt heute allerdings noch keine industriereife Technologie dar, kann deshalb und vor allem aus bergbausicherheitlichen Gründen in unmittelbarer Nähe zum Bergwerk NE nicht betrieben werden.

Allein schon wegen dieser begründeten bergbausicherheitlichen Bedenken kann eine geothermische Energiegewinnung mit dem HDR-Verfahren für die Bereitstellung der zur Dampferzeugung notwendigen Energie ebenfalls nicht in Frage kommen.

³⁸ Baisch, S. und Weidler, R. (2006): Seismisches Risiko bei geothermischen Reservoirstimulationen.- Eine seismologische Betrachtung des Basler Bebens.- <http://www.geothermie.de>

Reduzierung der im Werk Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer durch Eindampfen oder Tiefkühlen

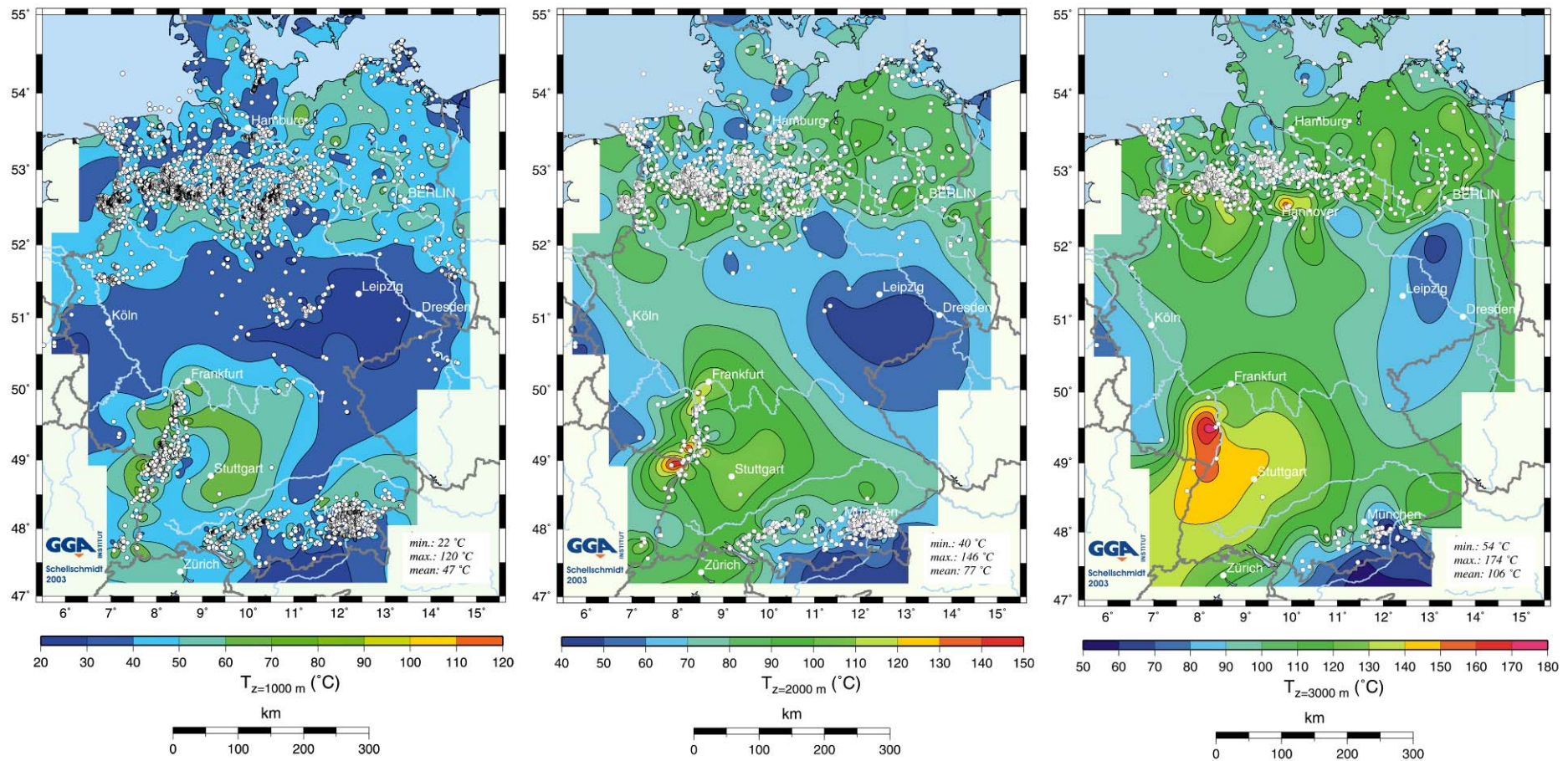


Abbildung 11 Temperaturverteilung im Untergrund Deutschlands für 1000, 2000 und 3000 m Tiefe

3.7 Zusammenfassende Bewertung der technischen Machbarkeit und wirtschaftlichen Vertretbarkeit der Eindampfung der zur Entsorgung anfallenden Salzwässer unter Ausnutzung alternativer Energieträger/-erzeugung

Die mit der Wahl dieser Alternative eingangs formulierte Erwartung wird zum einen Teil durch die Ergebnisse der eingehenden Untersuchungen bestätigt: Die Eindampfung der anfallenden Salzwässer führt zu keinem verwertbaren Kristallinat.

Die eingehende Untersuchung des Eindampfprozesses zeigt aber auch, dass allein für die Herstellung des Eindampfkristallinats aufgrund des relativ hohen Energieumsatzes Betriebskosten von etwa 326,60 EURO/t K_2O anfallen, wenn der erforderliche Heizdampf durch fossile Energieträger erzeugt wird. Diesen Kosten würde ein Erlös von etwa 196 EURO/t K_2O im Fertigprodukt gegenüberstehen. Dadurch wird deutlich, dass eine Eindampfung der anfallenden Salzwässer unter Verbrauch fossiler Energieträger aus Kostengründen und auch ökologisch unververtretbar ist, zumal mit diesem Verfahren eine entsprechend hohe CO_2 -Emission verbunden wäre.

Es war daher folgerichtig, auch den Einsatz alternativer Energieträger bzw. -erzeugung für ihren Einsatz bei der Heizdampferzeugung zu untersuchen. Das Ergebnis dieser Untersuchung belegt jedoch, dass die Nutzung von Solar- und Windenergie am Bedarf enormer Flächen für die Installation der Anlagen scheitert und die Nutzung geothermischer Energie durch das HDR-Verfahren aus bergbausicherheitlichen Gründen nicht in Frage kommen kann.

Das Verfahren der Tiefkühlung der anfallenden Salzwässer ist für eine deutliche Reduzierung der Salzfracht ebenfalls nicht geeignet.

Wegen der vergleichsweise geringen Gehalte einiger Hauptkomponenten (KCl, $MgCl_2$) ist eine nennenswerte Kristallinatbildung nicht zu erwarten.

Letztlich sind all diese technischen Probleme, der ausgesprochen hohe finanzielle Aufwand für die Anlagenerrichtung sowie den Betrieb, gepaart mit dem Auftreten nicht verwertbaren Kristallinates Ursache dafür, dass weder die thermische Eindampfungs- noch die Tiefkühlkristallisation in der Kaliindustrie weltweit zur Rückgewinnung von Wertstoffträgern aus gering mineralisierten Salzwässern praktiziert werden. Der hier unternommene Versuch, einen Vorschlag für die Realisierung der Volleindampfung bzw. der Laugentiefkühlung für die im Werk NE anfallenden Salzwässer vorzulegen, kann deshalb auch nicht als Stand der Technik gelten.

Zusammenfassend wird eingeschätzt, dass die beiden Möglichkeiten der thermischen Eindampfung oder auch die der Tiefkühlung für die an der Rückstandshalde Neuhof anfallenden Salzwässer aufgrund eines zu hohen Primärenergieverbrauches, den damit verbundenen Umweltbeeinflussungen und der unzureichenden Produktqualität

Reduzierung der im Werk Neuhoﬀ-Ellers der K+S KALI GmbH
anfallenden Salzwässer durch Eindampfen oder Tiefkühlen

der Kristallisate sowie mangels Möglichkeiten zur alternative Energieerzeugung keinen sinnvollen Beitrag zur nachhaltigen Reduzierung liefern kann. Diese ALTERNATIVE kann daher nicht zur Lösung des Problems beitragen und wird deshalb nicht weiter verfolgt.

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Hauptsächlich infolge der auf die Oberfläche der Rückstandshalde Neuhoﬀ und auf die versiegelten Flächen innerhalb des Werksgeländes einwirkenden Niederschläge fallen im Werk NE derzeit alljährlich etwa 700.000 m³ Salzwässer an (vgl. Abschnitte 2.2 und 2.4), die mineralisiert sind und entsprechend entsorgt werden müssen. Durch die bereits im Jahr 2003 im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens genehmigte Erweiterung der Rückstandshalde wird sich das Haldenvolumen und damit die Oberfläche der Rückstandshalde vergrößern, was künftig - auch ohne die Berücksichtigung der infolge klimatischer Veränderungen möglicherweise höheren Niederschlagsrate - zu einem steigenden Salzwasseranfall von schätzungsweise etwa 1,0 bis 1,1 Millionen m³ führen wird.

Da die in der Vergangenheit bis heute praktizierten Entsorgungspfade nicht geeignet sind, die derzeitige und erst recht die zukünftige Menge an Salzwässern zu beseitigen, wurde in dieser Studie eine theoretisch denkbare Alternative für die Entsorgung der im Werk NE anfallenden Salzwässer hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit untersucht. Dabei wurde dieses grundsätzlich denkbare Entsorgungsszenario hinsichtlich seiner Technologie und den notwendigen Anlagenkomponenten planerisch soweit konzipiert, dass eine Bewertung der technischen Machbarkeit und der ökonomischen Effizienz sowie der mit seiner Anwendung verbundenen ökologischen Konsequenzen möglich wurde.

Ausgehend von der globalen Zielstellung (vgl. Abschnitt 1) und den standortspezifischen Randbedingungen (vgl. Abschnitt 2) waren am Beginn der Bearbeitung zunächst grundsätzlich denkbare Entsorgungsalternativen zu identifizieren. In diesem ersten Schritt wurde bei theoretischer Betrachtung auch folgende technische Alternative als grundsätzlich denkbar und zweckdienlich befunden:

Eindampfen oder Tiefkühlen der Salzwässer

Die eingehende Prüfung der verfahrenstechnischen Prozesse, der technologischen Voraussetzungen, der bei einer industriellen Anwendung tatsächlich erreichbaren Ziele und ökologischen Auswirkungen sowie nicht zuletzt der damit verbundenen Kosten für diese Entsorgungsalternative kommt zu dem Ergebnis, dass die ALTERNATIVE Eindampfen oder Tiefkühlen der Salzwässer nicht zur Lösung des Problems beitragen kann, da sowohl die Eindampfung als auch die Tiefkühlung der an der

Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH
anfallenden Salzwässer durch Eindampfen oder Tiefkühlen

Rückstandshalde Neuhof anfallenden Salzwässer zu wirtschaftlich nicht verwertbaren Kristallisationsprodukten führt und außerdem aufgrund eines zu hohen Primärenergieverbrauches, den damit verbundenen Umweltbeeinflussungen und mangels Möglichkeiten zur alternativen Energiegewinnung keinen ökologisch sinnvollen Beitrag zur nachhaltigen Reduzierung liefern kann.

| | |
|--------------------|--|
| PFAD | O:\@Projekte EGB aktuell\EGB_06-035_Haldenloesung_Neuhof-Ellers\03proj_AUSLIEFERUNG\2007-07-04_ENDSTAND\Eindampfen\ALTERNATIVE_Eindampfen_NE_FINAL_rev03.doc |
| REVISION | 07 |
| GEPRÜFT VON | HR; EH |

ANHANG A zur Studie:
Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S
KALI GmbH zur Entsorgung anfallenden Salzwässer
durch Eindampfen oder Tiefkühlen

**Ergebnisse von theoretischen
Berechnungen und Laborversuchen
zur Eindampfung der zur Entsor-
gung im Werk Neuhof-Ellers
anfallenden Salzwässer**

Ergebnisse von phasentheoretischen und Laboruntersuchungen zur Eindampfung der zur Entsorgung anfallenden Salzwässer des Werkes Neuhoof-Ellers

Zur Untersuchung der technischen Voraussetzungen für eine Eindampfung der zur Entsorgung anfallenden Salzwässer wurden theoretische¹ sowie Laboruntersuchungen² durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den folgenden beiden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 1 Mittlere Zusammensetzung der zur Entsorgung der im Werk NE anfallenden Salzwässer

| | |
|-------------------|-------------------------|
| KCl | 37 g/l |
| MgCl ₂ | 58 g/l |
| MgSO ₄ | 74 g/l |
| NaCl | 122 g/l |
| Wasser | 919 g/l. |
| Dichte | 1,209 g/cm ³ |
| Temperatur | 22°C |

¹ Wambach-Sommerhoff (2006): Phasentheoretische Betrachtungen zur Eindampfung von Halden- und Versenklösungen (NE), Heringen, 16. Februar 2006

² Jetzki, M. (2007): Interne Notiz zum Vorgang: Eindampfversuche zur Verwertung von Versenklösung ex NE, 2 Seiten, Heringen, 30. März 2007

Tabelle 2 Zusammensetzung der Bodenkörper, zusammengestellt nach Untersuchungen von Wambach-Sommerhoff (2006¹)

| Eindampfungs- grad % | Löweit | Halit | Langbeinit kg / t Ausgangslösung | Kieserit | Sylvin | Carnallit | Bischofit | K ₂ O | MgO | SO ₄ |
|--|----------------|----------------|-------------------------------------|---------------|---------------|----------------|--------------|------------------|-------|-----------------|
| 43 | 32,0 100,0% | | | | | | | 0,0% | 13,1% | 62,5% |
| 53 | 39,0 60,0% | 26,0 40,0% | | | | | | 0,0% | 7,9% | 37,5% |
| 56 | 31,0 42,5% | 33,0 45,2% | 9,0 12,3% | | | | | 2,8% | 8,0% | 26,5% |
| 81 | | 93,0 58,5% | 29,0 18,2% | 37,0 23,3% | | | | 4,1% | 7,6% | 27,0% |
| 86 | | 97,0 52,4% | | 69,0 37,3% | 19,0 10,3% | | | 6,5% | 10,9% | 25,9% |
| 92 | | 100,0 | | 70,0 | | 108,0 | | | | |
| (nur noch 2,1 % der anfänglichen Lsg.menge) | | 36,0% | | 25,2% | | 38,8% | | 6,6% | 13,0% | 17,5% |
| 92 | | 100,0 33,8% | | 70,0 23,6% | | 108,0 36,5% | 18,0 6,1% | 6,2% | 13,4% | 16,4% |

PFAD O:\@Projekte EGB aktuell\EGB_06-035_Haldenloesung_Neuhoof-Ellers\03proj_AUSLIEFERUNG\2007-06-01_ENDSTAND\ALTERNATIVE_Eindampfen_AnhangA_FINAL.doc

REVISION 07

GEPRÜFT VON HR: EH

ANHANG B zur Studie:
Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S
KALI GmbH anfallenden Salzwässer durch Ein-
dampfen oder Tiefkühlen

Referenzdaten zur Nutzung
alternativer Energieträger bzw.
-erzeugung in Mitteleuropa

Referenzdaten zur Nutzung alternativer Energieträger
bzw. -erzeugung in Mitteleuropa

Möglichkeiten für den Einsatz alternativer Energieträger und/oder -erzeugung in Mitteleuropa

Nachfolgend werden die theoretischen Grundlagen und praktischen Anwendungskonzepte sowie ausgewählte Referenzen zum Einsatz alternativer Energieträger und/oder -erzeugung in Mitteleuropa, soweit sie für die hier zur Rede stehende Aufgabenstellung bedeutsam sind, erläutert.

1.1 Solarenergie

Grundlagen

Photovoltaische Anlagen nutzen Sonnenenergie zum Erzeugen vom Strom. Der Strom wird von Solarzellen als Gleichstrom erzeugt, von Wechselrichtern in Wechselstrom umgewandelt und in das Stromnetz eingespeist. Aufgrund der hohen Herstellungskosten der Module ist der Strom aus Sonnenenergie (0,37 bis 0,52 €/kWh) deutlich teurer als der aus herkömmlichen Kraftwerken (0,06 bis 0,08 €/kWh).

In Deutschland installierte Solaranlagen erzielen im Juli einen bis zu fünfmal höheren Ertrag als im Dezember. Da es noch keine Möglichkeit einer wirtschaftlichen Speicherung der gewonnenen Solarenergie gibt (Umspeicherungsverluste betragen ca. 50%), können photovoltaische Anlagen nur als sinnvolle Ergänzung zu den herkömmlichen Energiequellen eingesetzt werden.

Technische Daten

Die Nennleistung bei den Photovoltaikanlagen wird in kWp¹ angegeben, wobei p für das englische peak (Höchstwert) steht. Dieser Wert dient dem Vergleich der Module und wird bei folgenden Standardbedingungen durchgeführt

- Modultemperatur von 25°C
- Bestrahlungsstärke von 1.000 W/m²
- Air Mass² von 1,5.

Da bei realen Arbeitsbedingungen diese Werte nicht eingehalten werden können, entspricht in Deutschland 1 kWp (1000 Watt) Nennleistung 700 bis 900 kWh pro

¹ Kilowatt-Peak

² Als Air Mass, kurz AM, auch Luftmasse, bezeichnet man die Abschwächung der Strahlung durch die Atmosphäre. Ein Wert von AM gleich 1,5 entspricht der Solarstrahlung auf der Erde um den 50. Breitengrad.

Jahr. Für die Erzeugung von 1 kWp wird eine Solarmodulfläche von ca. 10 m² benötigt.

In den südlichen Ländern kann mit den gleichen Modulen viel mehr Energie gewonnen werden, wie zum Beispiel⁴:

| | |
|--------------------------|--------------------|
| Süddeutschland: | ~900-1130 kWh/Jahr |
| Italien, Sizilien: | ~1800 kWh/Jahr |
| Südspanien: | ~1800 kWh/Jahr |
| China, Takla Makan: | ~1840 kWh/Jahr |
| USA, Great Basin: | ~1930 kWh/Jahr |
| Spanien, Kanaren: | ~2000 kWh/Jahr |
| USA, Hawaii: | ~2100 kWh/Jahr |
| Afrika, Sahara: | ~2270 kWh/Jahr |
| Australien, Great Sandy: | ~2320 kWh/Jahr |
| Naher Osten, Arabien: | ~2360 kWh/Jahr |
| Südamerika, Atacama: | ~2410 kWh/Jahr |

Die Wirkungsgrade der Solarmodule betragen bis zu 17,7 %. Damit die Solarzellen optimal arbeiten, müssen sie in einem Neigungswinkel von 30° bis 35° und in Richtung Süden (Südost bis Südwest) angebracht werden. Die Solarzelle muss fest installiert werden und das Montagesystem den Belastungen der Witterung (Wind, Schnee) standhalten. Des Weiteren sollten aufgrund der erhöhten Korrosionsgefahr bei der Installation die Belastungen durch Salz (empfohlener Abstand vom Meer 500 m) und Schwefel berücksichtigt werden³.

1.2 Windenergie

Die Windkraftenergie zählt zu den erneuerbaren Energien, wobei von den Windkraftanlagen die kinetische Energie des Windes in Strom umgesetzt wird.

Bei der Gewinnung des elektrischen Stromes durch Windenergie werden nur ca. 40 % der aerodynamischen Leistung umgesetzt. Mit Hilfe eines Generators wird der Strom in eine stromübliche Frequenz von 50 Hz umgewandelt. Dabei entstehen mechanische Verluste am Getriebe, welche in Abbildung 1 dargestellt sind.

³ SolarWorld: Planung und Ausführung Energiedach® von SolarWorld

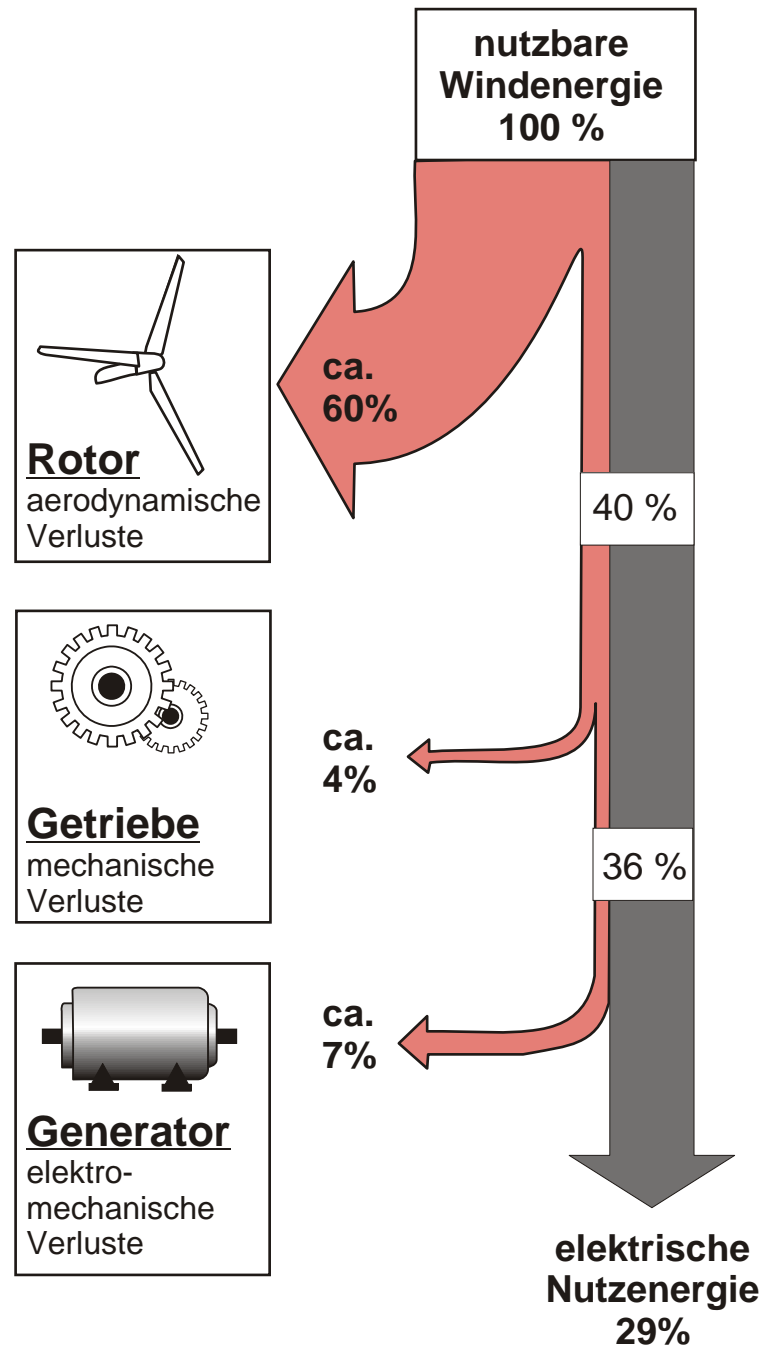


Abbildung 1 Elektrische Nutzenergie⁴

⁴ Kasang, D. (2004): Windenergie.-Hamburger Bildungsserver.-
<http://lbs.hh.schule.de/welcome.phtml?unten=/klima/energie/erw-0.html>, 2004

Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass die elektrische Nutzenergie ca. 29 % der theoretisch nutzbaren Energie beträgt.

Die vom Wind - insbesondere der Windstärke und -richtung - beeinflusste Abhängigkeit dieser Art der Energieerzeugung erlaubt keine kontinuierliche Stromversorgung.

Aus Abbildung 2 wird deutlich, dass die Windkraftanlagen keinen kontinuierlichen Ertrag über das gesamte Jahr liefern und sich auch jährlich unterscheiden (1988-1993)⁴.

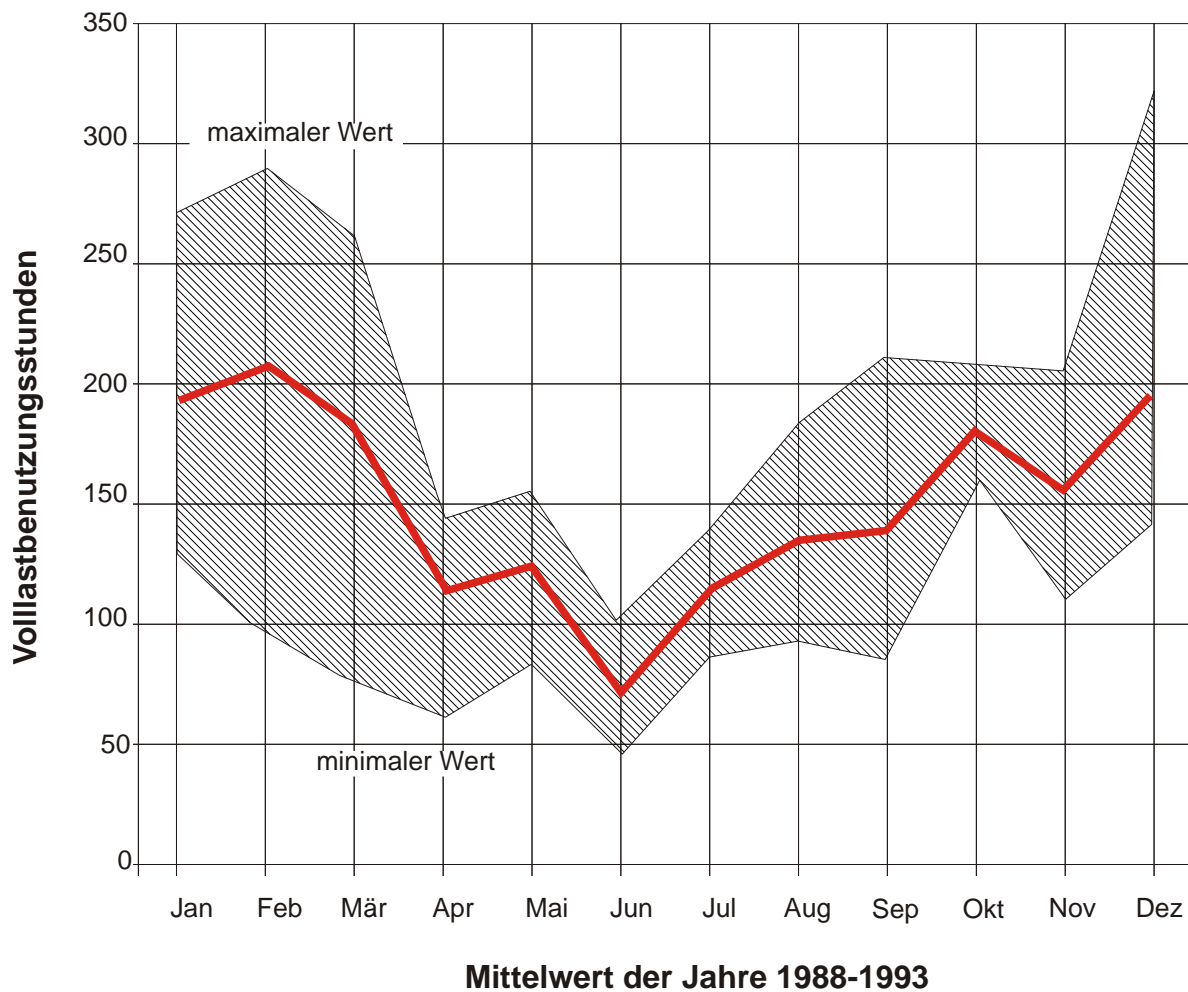


Abbildung 2 Monatliche Vollastbenutzungsstunden am Standort Windenergiepark Westküste (Mittelwert der Jahre 1988-93)⁴

Stromkosten

Die Vergütung für Strom aus Windkraft beträgt derzeit 8,53 Cent/kWh für die ersten fünf Jahre, nach Erreichen eines Referenzertrages fällt der Betrag auf 5,39 Cent pro kWh⁵.

Die Kosten für Strom aus Windkraft liegen damit zwei- bis dreimal höher als für Strom aus herkömmlichen Energiequellen.

Ertrag der Windkraftwerke

Der Ertrag der Windkraftwerke hängt von folgenden Faktoren ab:

- örtliche Gegebenheiten wie Oberflächenrauigkeit,
- Anströmungsverhalten des Windes,
- Hindernisse in der Umgebung,
- erwartetes Windpotenzial am Standort,
- Anlagentyp, -größe und -spezifikation,
- vorgegebene und begrenzende Anlagenhöhe am Standort,
- Windparkkonfiguration (Anordnung der einzelnen Anlagen, Abstände⁶).

Das Windpotenzial ist in hohem Maße von den Windgeschwindigkeiten und der Anzahl der Betriebsstunden unter Volllast abgängig. In Abbildung 3 sind die Windzonen in Deutschland dargestellt.

Windkraftanlagen in Deutschland erreichen durchschnittlich eine jährliche Leistung von ca. 2.000 Stunden im Volllastbetrieb. Im Vergleich dazu betragen die jährlichen Betriebsstunden in Volllastbetrieb in Dänemark 2.300 Stunden und in Wales, Schottland sowie im Westen Irlands 3.000 Stunden.

⁵ Bundesverband Windenergie e.V. (2006): Das Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG), 3.11.2006

⁶ WindStrom Unternehmensgruppe: Leitungen/Produkte.-<http://www.windstrom.de/de/leistungen.htm>

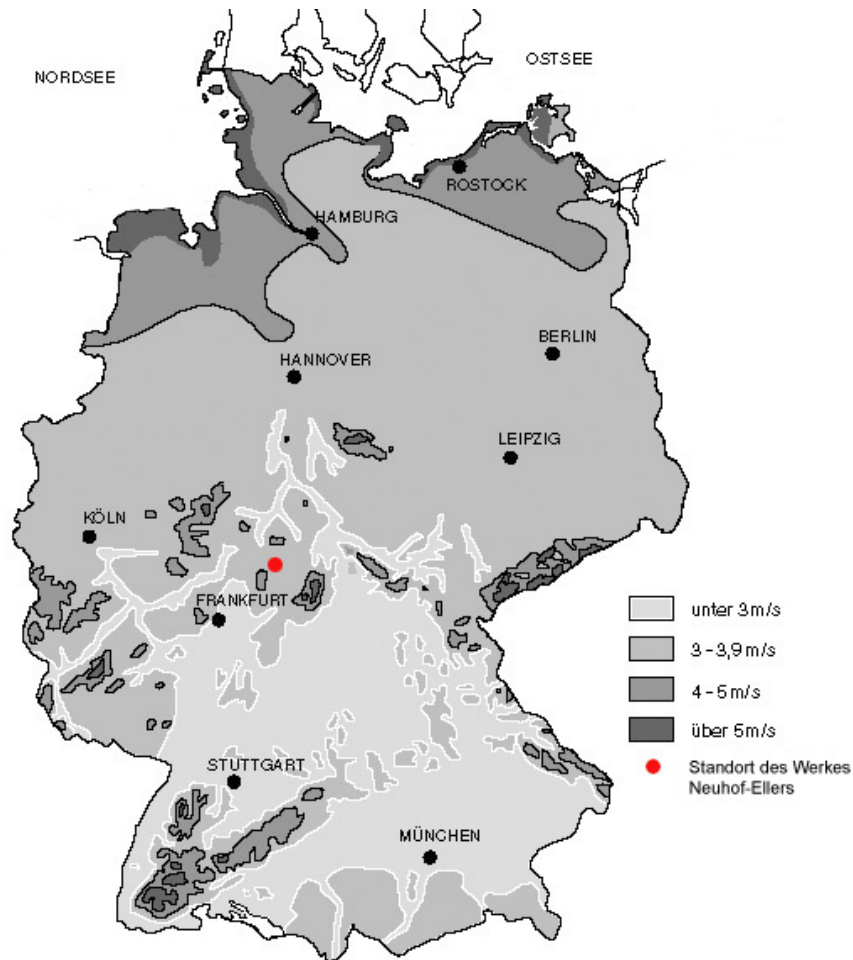


Abbildung 3 Windzonen in der Bundesrepublik Deutschland⁴

Windparkkonfiguration

Bei der Planung von Windenergieparks muss berücksichtigt werden, dass die einzelnen Windkraftanlagen nicht im Windschatten der anderen stehen. Um dies zu vermeiden, sollte ein Mindestabstand der Anlagen untereinander von etwa dem fünffachen des Rotordurchmessers eingehalten werden. Bei einer mehrreihigen Anordnung entgegen der Windhaupttrichtung sollten größere Abstände eingeplant werden, damit die vorderen Reihen keinen Einfluss auf die hinteren Reihen haben⁴.

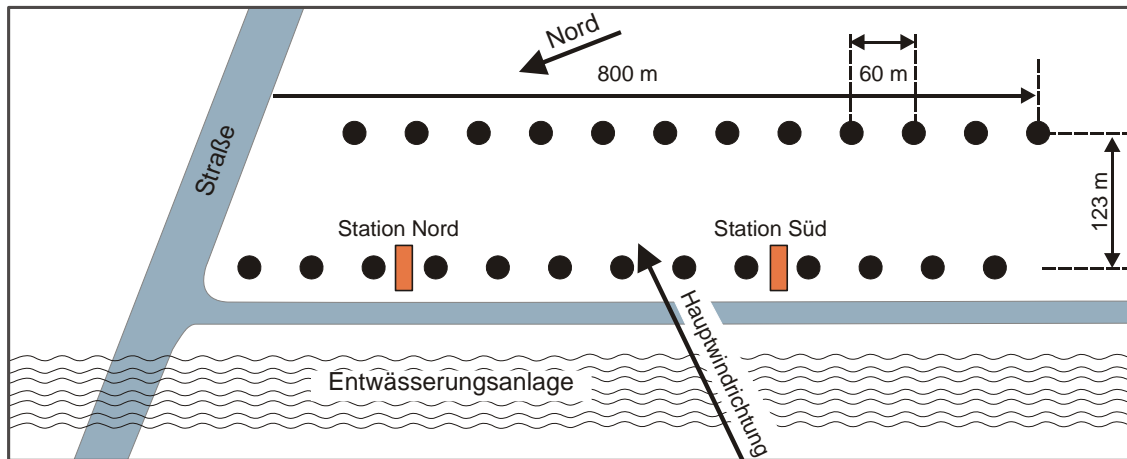


Abbildung 4 Anordnung der Windkraftanlagen im Windpark Cuxhaven

1.3 Geothermie

Grundlagen

Bei der Geothermie (Erdwärme) wird die unter der Erdoberfläche gespeicherte Energie genutzt. Die Erdwärme hat ihren Ursprung in der Entstehungsenergie der Erde (30-50 %) und in dem radioaktiven Zerfall der langlebigen radioaktiven Isotope, wie Uran-235, Uran-238, Thorium-232 und Kalium-40 (50-70 %).

Die Anwendung der Geothermie besitzt gegenüber der Wind- und Sonnenenergie einen sehr großen Vorteil, da sie nicht nur ökologisch sauber sondern auch grundlastfähig ist.

Die Energiegewinnung aus der Geothermie kann man nach ihrer Anwendung in drei wesentliche Bereiche unterscheiden:

- oberflächennahe Geothermie bis ca. 400 m Tiefe zum Beheizen und Kühlen von Räumen mit Hilfe von Sonden und eventuell nachgeschalteten Wärmepumpen,
- hydrothermale (natürliche Thermalwässer) Erdwärmevorkommen zur Wärmelieferung an das Heiznetz und/oder Stromerzeugung (Tiefengeothermie)
- *Hot Dry Rock* HDR-Verfahren (hydraulisch stimulierte Riss- und Kluft-Systeme im trockenen Untergrund) zur Wärmelieferung an das Heiznetz und/oder Stromerzeugung (Tiefengeothermie)^{7,8}.

⁷ Saadat, A.; Huenges, E.; Hurter, S.; Köhler, S.; Giese, L.; Trautwein U. (2001): Nachhaltige Energiegewinnung aus Erdwärme.-TA-Datenbank-Nachrichten, Nr. 3 / 10. Jahrgang –September 2001, Seite 49-54.-GeoForschungsZentrum Potsdam, 2001

Bei der Tiefengeothermie unterscheidet man zwischen Hochenthalpie- und Niederenthalpie-Lagerstätten. Hochenthalpie-Lagerstätten sind durch geothermische Anomalien (meistens Vulkanaktivitäten) gekennzeichnet und werden weltweit zur Stromerzeugung genutzt. In Tabelle 1 sind weitere Beispiele für Länder mit Vulkanaktivitäten und daraus resultierenden Ressourcen aufgeführt.

Tabelle 1 Hochenthalpie- Lagerstätten mit Vulkanaktivitäten ⁹

| <i>Anzahl der Vulkane</i> | <i>Land</i> | <i>Geothermische Ressource MWe¹⁰</i> |
|---------------------------|-------------------|---|
| 133 | USA | 23.000 |
| 100 | Japan | 20.000 |
| 126 | Indonesien | 16.000 |
| 53 | Philippinen | 6.000 |
| 35 | Mexiko | 6.000 |
| 33 | Island | 5.800 |
| 19 | Neuseeland | 3.650 |
| 3 | Italien (Toskana) | 700 |

Der geothermische Tiefenverlauf in Niederenthalpie-Lagerstätten ist stark ortsabhängig. Er beträgt durchschnittlich 30°C/km, wobei dieser Wert nur als ein grober Richtwert angesehen werden kann. In Abbildung 5 ist die Temperatur-Tiefenverteilung für unterschiedliche Standorte und deren Nutzung dargestellt¹¹.

⁸ VIKA Ingenieur GmbH <http://www.vika.de>

⁹ Quelle: Literatur/Statistik, 5.

¹⁰ Elektrische Leistung

¹¹ Saadat, A., Huenges, E., Hurter, S., Köhler, S., Giese, L., Trautwein, U.: Nachhaltige Energiegewinnung aus Erdwärme.-TA-Datenbank-Nachrichten, Nr. 3/10. Jahrgang, Seite 49-54,- Geoforschungszentrum Potsdam, September 2001

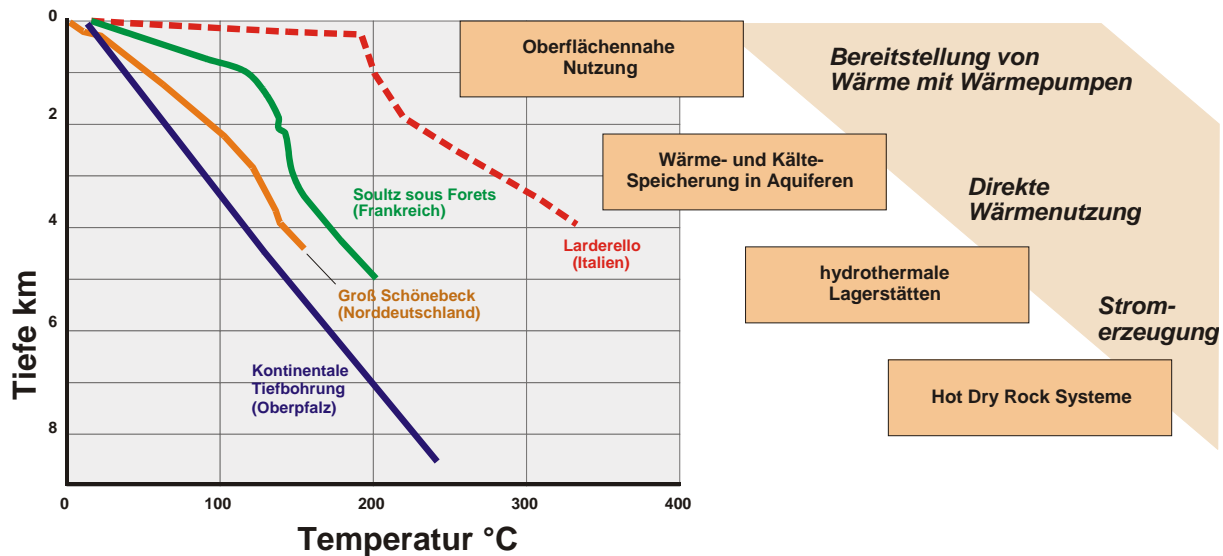


Abbildung 5 Nutzung der Erdwärme und Temperatur-Tiefenverteilung ¹¹

Da für das Eindampfen von Salzwässern wie auch für die Stromerzeugung, eine große Menge Dampf (Turbinenantrieb) zur Verfügung gestellt werden muss, sind für die weitere Betrachtung die hydrothermale Geothermie und das HDR-Verfahren von Bedeutung.

Hydrothermale Geothermie

Die wirtschaftliche Nutzung der hydrothermalen Lagerstätten ist von der wasserführenden Gesteinsschicht (Nutzhorizont), von der vertikalen und lateralen Verbreitung der Gesteinsschicht (Nutzreservoir) sowie von der Temperatur abhängig.

Eine wichtige Rolle spielen der Volumenstrom und die Zusammensetzung der Thermalwasservorräte. Die Thermalwässer können eine beträchtliche Menge an Salzen und anderen mineralischen Bestandteilen (z.B. Schwefel) enthalten. Aus diesem Grund ist es nicht immer möglich Thermalwässer, die zum Teil auch in Form von Dampf vorliegen, direkt zur Stromgewinnung zu nutzen ¹¹.

„In Deutschland sind als potenzielle Nutzhorizonte zwei grundsätzlich verschiedene Gesteinstypen von Interesse (Abbildung 7). Sie unterscheiden sich in ihren strukturellen Eigenschaften, in der zeitlichen Anlage des Speicherraums und in der regionalen Verbreitung. Es handelt sich

- *um primär poröse und mit Schichtwasser gefüllte Gesteine (Porenspeicher; z. B. mesozoische Sandsteine des Norddeutschen Beckens)*
- und
- *um sekundär geklüftete und/oder kavernöse Gesteine (Kluft-/ Karst-speicher; z.B. Malmkarbonate des Bayrischen Molassebeckens).¹¹*

Abbildung 6 gibt einen Überblick über die hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Standortbeurteilung einschließlich Wasserdurchlässigkeiten und Schutzzonen zur Nutzung von Erdwärme im Bundesland Hessen.

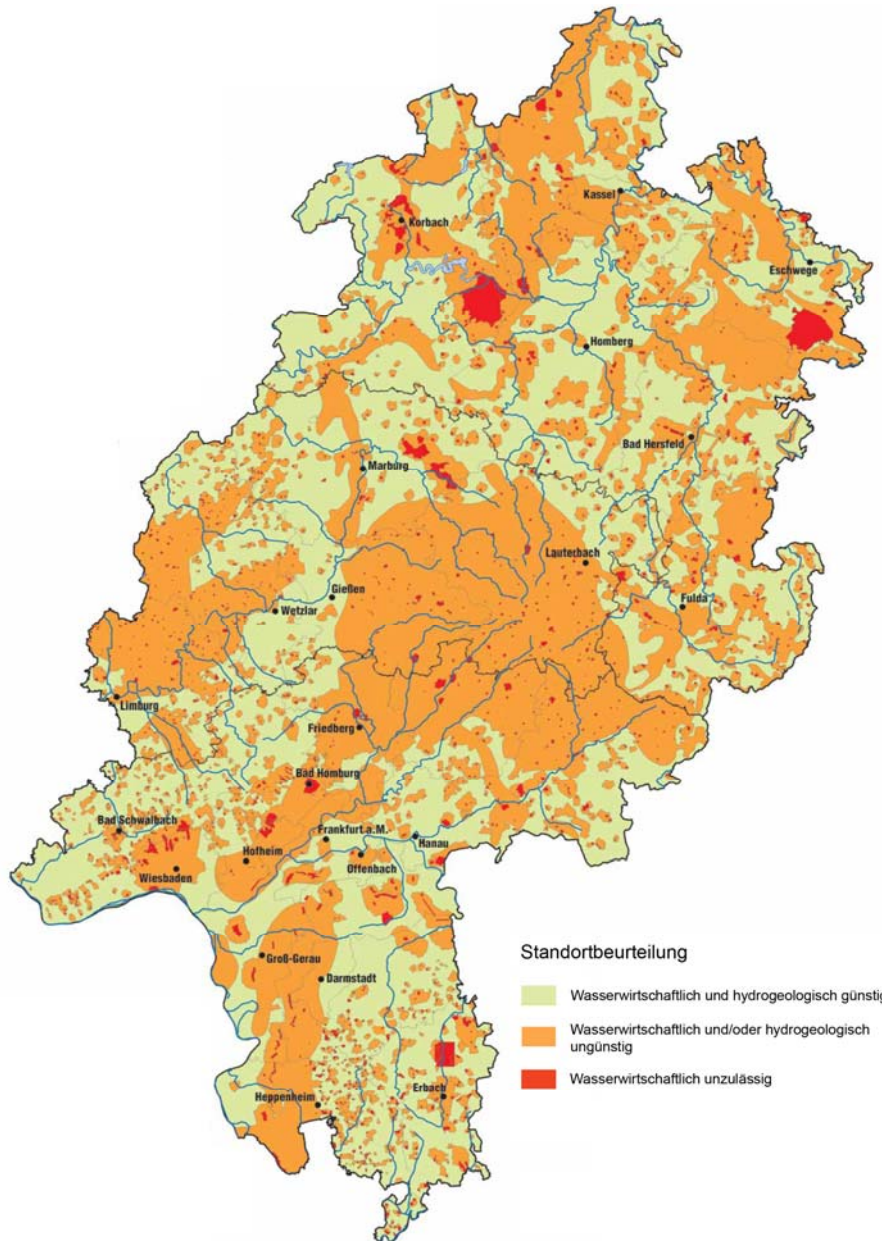


Abbildung 6 Hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Standortbeurteilung für die Errichtung von Erdwärmesonden in Hessen¹²

¹² Rumohr, S., Fritsche, J.-G. (2005): Erdwärmennutzung in Hessen, Leitfaden für Erdwärmepumpen (Erdwärmesonden) mit einer Heizleistung bis 30kW.-Hrsg.: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2. überarbeitete Auflage, Wiesbaden, 2005

In Deutschland werden hydrothermale Quellen nicht zur Stromerzeugung genutzt, da deren Temperatur für den direkten Turbinenantrieb zu niedrig ist und die Anwendung des ORC-Verfahrens (Organic Rankine Cycle) oder des Kalina-Verfahrens problematisch ist. Mit dem ORC-Verfahren kann ein Wirkungsgrad von 12 % bei einer Thermalwassertemperatur von 150°C erreicht werden. Der Wirkungsgrad wird mit niedriger Temperatur immer kleiner^{11,13}.



Abbildung 7 Hydrothermale Vorkommen in Deutschland nach GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM, 2001¹¹

¹³ Rachow, R (2004).: Kalter Dampf und heißer Preis.-In: e.l.b.w. Umwelttechnik 04 / 2004.-
<http://www.orc-process.com/doc/legal-foundation/GEOCAL.htm>

Hot Dry Rock – Verfahren (HDR)

Das HDR-Verfahren ist unabhängig von Thermalwasservorräten und wasserführenden Gesteinsschichten. Bei diesem Verfahren werden mittels hydraulischer Stimulation (Verpressen von Wasser unter hohem Druck) Risse und Kluftsysteme geschaffen, in denen sich eine ausreichende Menge an Wasser erwärmen kann.

Zur Zeit wird dieses Verfahren in Hinblick auf die Stromerzeugung noch erprobt. Es laufen im Rahmen eines EU Projektes Pilotanlagen in Rosemanowes (Großbritannien), Bad Urach (Deutschland) und Soultz-sous-Forêt (Rheintalgraben, Frankreich)¹¹.

In Abbildung 8 ist die Temperaturverteilung in Bad Urach (Deutschland) und Soultz-sous-Forêt (Frankreich) dargestellt. In der Pilotanlage in Soultz soll im Jahr 2008 die letzte Projektphase abgeschlossen werden, dabei wurde als Ziel eine 6 MWe Leistung geplant.

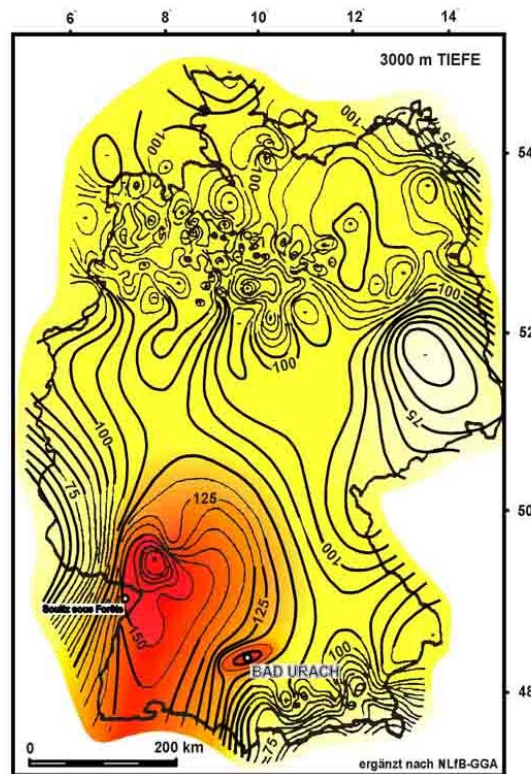


Abbildung 8 Temperaturverteilung in Bad Urach (Deutschland) und Soultz-sous-Forêt (Frankreich)¹⁴

¹⁴ Stadtwerke Bad Urach - Geothermische Energie http://www.geothermie.de/bad_urach2.htm

Trotz der hohen, staatlich subventionierten Abnahmepreise von 15 Cent/kWh (EEG) sind nur wenige Standorte für die mögliche Umsetzung des HDR-Verfahrens geeignet.

Da mit zunehmender Teufe die Bohrkosten überproportional ansteigen¹⁵, sind für eine wirtschaftliche Stromerzeugung Temperaturen von über 100°C in 1000 m Tiefe erforderlich.

Das Erdreich im Umfeld des Werkes NE besitzt in 1000 m Teufe eine Temperatur von 35°C bis 40°C. Erst in einer Teufe von 2000 m werden die erforderlichen 100°C für eine wirtschaftliche Energienutzung nach dem HDR-Verfahren erreicht.

¹⁵ Geothermale Zukunft, Tiefenbohrungen in Unterhaching und Offenbach.-Copyright (c) 1998 - 2006 geoscience online Springer Verlag Heidelberg - MMCD interactive in science Düsseldorf

Tabelle 2 Zusammenfassung wichtiger Aspekte zum Einsatz alternativer Energien

| | Solarenergie | Windenergie | Geothermie |
|---|---|---|---|
| Grundlagen der Energiegewinnung | | | |
| | Einsatzbedingungen der Solarmodule: Neigungswinkel 30...35° Richtung Südost...Südwest Installation gegen Belastungen von Wind und Schnee erforderlich Keine Salzbelastungen Spezifische Kosten 37...50 Cent/kWh Keine Grundlastfähigkeit Nennleistung Photovoltaikanlage (Deutschland) 1 kWp = 700-900 kWh/a Wirkungsgrad der Solarmodule ca.18% Flächenbedarf der Solarmodule 10 m²/kWp | Energiegewinn aus der nutzbaren Windenergie 30 % Abhängigkeit der Verfügbarkeit der Windenergie von Standort (Windpotenzial), Tageszeit, Jahreszeit Mittlere Verfügbarkeit (Volllaststunden) 10...30% Stromkosten (Vergütung) 5,39 / 8,53 Cent/kWh | Bereiche der Energiegewinnung: Oberflächennah bis 400 m Tiefe zur Raumheizung Hydrothermale Erdwärme für Heiznetze oder zur Stromerzeugung HDR-Verfahren für Heiznetze oder zur Stromerzeugung Mindesttemperatur für HDR-Verfahren >30 °C/km Erdwärme ist grundlastfähig |
| Einsatz für die Bereitstellung der Energie zur Eindampfung | | | |
| Benötigte Leistung | 169.800 MWh/Jahr | 169.800 MWh/Jahr | Hydrothermale Ressourcen sind im Bereich um Neuhoof-Ellers nicht nachgewiesen (Abbildung 7). |
| Wirkungsgrad der Energieumwandlung | 85 % (geschätzt) | 85 % (geschätzt) | Die Einsatzgrenze für das HDR-Verfahren wird im Bereich um Neuhoof-Ellers gerade erreicht aber nicht relevant überschritten: |
| Energiekosten | 85 ... 120 Millionen €/Jahr | 9 ... 15 Millionen €/Jahr | 1.000 m Tiefe 30-40 °C 30-40°C/km 2.000 m Tiefe 70-80 °C 35-40°C/km 3.000 m Tiefe 100-110°C 33-37°C/km |
| Fläche | Benötigte Solarzellenfläche 1,9 ... 2,4 km² Installationsfaktor 50 % (geschätzt) Installationsfläche 3,8 ... 4,8 km² | Windzone (mäßig) 3 ... 3,9 m/s Verfügbarkeit ca. 2.000 ha Flächenbedarf > 100 ha Verfügbare Haldenfläche (Plateau) ca. 3 ha | Der Standort muss als ungeeignet eingeordnet werden. |

| | |
|--------------------|---|
| PFAD | O:\@Projekte EGB aktuell\EGB_06-035_Haldenloesung_Neuhoof-Ellers\03proj_AUSLIEFERUNG\2007-06-01_ENDSTAND\ALTERNATIVE_Eindampfen_AnhangB_FINAL.doc |
| REVISION | 07 |
| GEPRÜFT VON | HR; JK; EH |