



TU Wien

Inst. für Wassergüte und Abfallwirtschaft
o. Prof. Dr. Paul H. Brunner - A-1040 Wien



Umweltbundesamt

SYSTEMANALYSE UND STOFFBILANZ EINES KALORISCHEN KRAFTWERKES - SYSTOK -

Elisabeth Schachermayer
Helmut Rechberger
Paul H. Brunner
Walter Maderner

**MONOGRAPHIEN
BAND 67**

Wien, Mai 1995

Bundesministerium für Umwelt



Autoren: Elisabeth Schachermayer, Helmut Rechberger, Paul H. Brunner (Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft), Walter Maderner (Umweltbundesamt)

Übersetzung: Christina Preiner

Layout: Inge Hengl, Lisa Lössl

Titelphoto: Österreichische Draukraftwerke Aktiengesellschaft

Die Studie wurde in Zusammenarbeit mit der Verbundgesellschaft und der TU-Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, erstellt.

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt, 1090 Wien, Spittelauer Lände 5

Druck: Melzer, Wien

© Umweltbundesamt Wien, Mai 1995
Alle Rechte vorbehalten
ISBN 3-85457-253-0

Vorwort

"Die Herausforderung der Zukunft wird weltweit darin bestehen, dafür zu sorgen, daß Wirtschaftswachstum, wirksame und sichere Energieversorgung und eine gesunde Umwelt miteinander vereinbare Ziele darstellen." (Zitat aus dem Fünften Umweltaktionsprogramm der EG).

Das Fünfte Umweltaktionsprogramm der EG vom 1. Februar 1993, das bis zum Jahr 2000 ausgerichtet ist, zielt darauf ab, Veränderungen im Verhalten der Gesellschaft zu erreichen. Es sollen alle Bereiche der Gesellschaft auf optimale Weise im Geiste einer gemeinsamen Verantwortung eingebunden werden. Die Verantwortung wird dadurch geteilt, daß die Palette der Instrumente, die zusammen zur Lösung bestimmter Probleme verwendet werden, deutlich erweitert wird. Während frühere Umweltschutzmaßnahmen darauf beruhten, bestimmte Verhaltens- oder Verfahrensweisen zu verbieten, verfolgt das neue Konzept das Prinzip der Zusammenarbeit zwischen allen Beteiligten. Die bisherigen Aktionsprogramme basierten fast ausschließlich auf dem Erlass von Rechtsvorschriften. Nunmehr soll der Dialog zwischen Unternehmen und Öffentlichkeit gefördert und durch andere Formen der Umweltpolitik, insbesondere durch freiwillige Systeme der Selbstkontrolle unterstützt werden.

Als Konsequenz dieser "Wende" in der Umweltpolitik geht die Verordnung Nr.1836/93 des Rates vom 29. Juni 1993 über die freiwillige Beteiligung gewerblicher Unternehmen an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (EMAS-Verordnung oder ÖKO-Audit-Verordnung genannt) davon aus, daß die Industrie Eigenverantwortung für die Bewältigung der Umweltfolgen ihrer Tätigkeiten trägt und daher in diesem Bereich zu einem aktiven Konzept kommen sollte. Diese Eigenverantwortung verlangt von den Unternehmen zunächst eine erste Umweltbestandsaufnahme (Umweltprüfung), die Festlegung und Umsetzung ihrer unternehmerischen Umweltpolitik, die Formulierung von Umweltzielen und -programmen sowie die Implementierung eines wirksamen Umweltmanagementsystems.

Im vorliegenden Projekt "Systemanalyse und Stoffbilanz eines kalorischen Kraftwerkes - SYSTOK" wurde eine Methodik ausgearbeitet, um die stofflichen und energetischen Aspekte des Kraftwerkes darzustellen, und diese in einen Bezug zur Region zu setzen. Mittels einer Systemanalyse wurde die gesamte Prozeßkette von der Kohlegewinnung, der Kohlelagerung, der Verstromung bis zur Verwertung und Endlagerung der Aschen untersucht. Als Methodik zur Systembeschreibung wurde die Stoffflußanalyse verwendet. Sie definiert die wichtigsten Prozesse (Quellen, Transporte und Transformationen, Senken), Güter (d.h. handelbare Substanzen mit positivem oder negativem Wert wie Braunkohle, Kalziumkarbonat oder Abgase) und Stoffe (Elemente oder chemische Verbindungen, z.B. Kohlenstoff, Kohlendioxid, Aluminium, Eisenchlorid). Neben ersten groben Stoffbilanzen für Kohlenstoff und Schwefel, wurde auch eine Energie- und Volumensbilanz für das Gesamtsystem erstellt. Ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit war die Ausarbeitung von systemtheoretisch begründbaren Ansätzen zur Einbettung von Kraftwerk und Peripherie in die Region. Es wurden unter anderem folgende Fragen untersucht:

- Welchen Beitrag liefert das Kraftwerk (inkl. Kohleabbau) zu den Ressourcen der Region?
- Wo werden Potentiale abgebaut, wo welche aufgebaut, und wie verhalten sich diese Veränderungen gegenüber geogenen Änderungen in der Region?

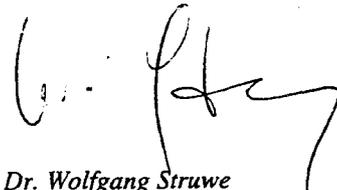
- Welches sind die wichtigsten Quellen, Transportwege und Transformationen, sowie letzten Senken von Stoffen, die entweder als Hauptbestandteile oder als wichtige Spurenstoffe durch das System und durch die Region fließen?
- Welche langfristigen Entwicklungen und Folgen sind durch die Stoffflüsse und Lageränderungen zu erwarten?
- Wo sind Schwachstellen bezüglich langfristigen Umweltbelastungen und Ressourcenverknappungen, und mit welchen Maßnahmen können diese effizient eliminiert werden?

Die Antworten zu diesen Fragen sollen es dem Unternehmen ermöglichen, aktive Umweltschutzmaßnahmen zu ergreifen.

Mit der vorliegenden Arbeit wurden wesentliche vorbereitende Schritte für eine spätere Beteiligung am gemeinschaftlichen ÖKO-Audit-System geleistet, die aber noch eine umfassende Umweltbetriebsprüfung und eine Begutachtung durch einen zugelassenen unabhängigen Gutachter erfordert. Doch schon jetzt erfüllt die Arbeit einen wesentlichen Zweck des ÖKO-Audit-Verfahrens, nämlich eine Verbesserung der Information der Unternehmensleitung und der Öffentlichkeit über die stofflichen und energetischen Aspekte der Umweltauswirkungen des Kraftwerkes Voitsberg 3 für die gesamte Region.



*Dipl. Ing. Dr. Herbert Schröfelbauer
(Vorstandsdirektor des Verbund)*



*Dr. Wolfgang Struwe
(Direktor des Umweltbundesamtes)*

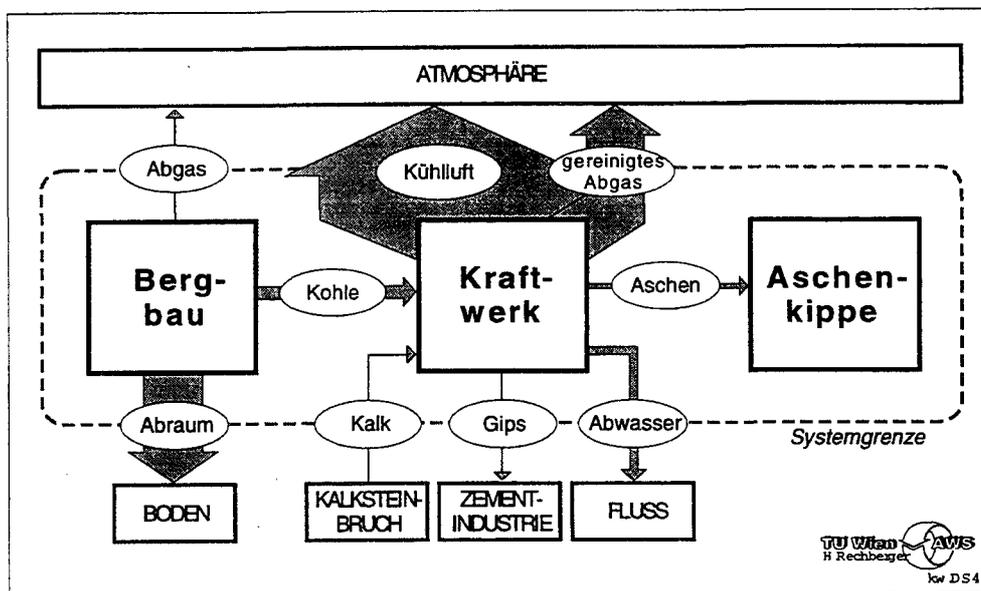
Systemanalyse und Stoffbilanz eines kalorischen Kraftwerkes- Kurzfassung

Für die umweltbewusste Unternehmensführung bedeutet das Konzept des *regional umweltverträglichen Stoffhaushaltes* eine neue Herausforderung. Der Betrieb soll seinen Beitrag zur Region in stofflicher und energetischer Hinsicht untersuchen und so gestalten, daß sein Wirken für die Region zu einer dauerhaft hohen Wertschöpfung mit minimaler Umweltbelastung führt.

In der vorliegenden *Machbarkeitsstudie* wurden die Möglichkeiten der Untersuchung und Darstellung der stofflichen und energetischen Aspekte der Wechselwirkung zwischen Kraftwerk und Region analysiert.

Es wurde eine Methodik ausgearbeitet, um das kalorische Kraftwerk Voitsberg 3 inklusive des zuliefernden Kohlebergbaues Oberdorf und der Lagerung der Asche im Karlschacht 2 zu einem Gesamtsystem *Kraftwerk mit Peripherie* zu verknüpfen. Abb.K-1 zeigt die relevanten Güterflüsse für diese System.

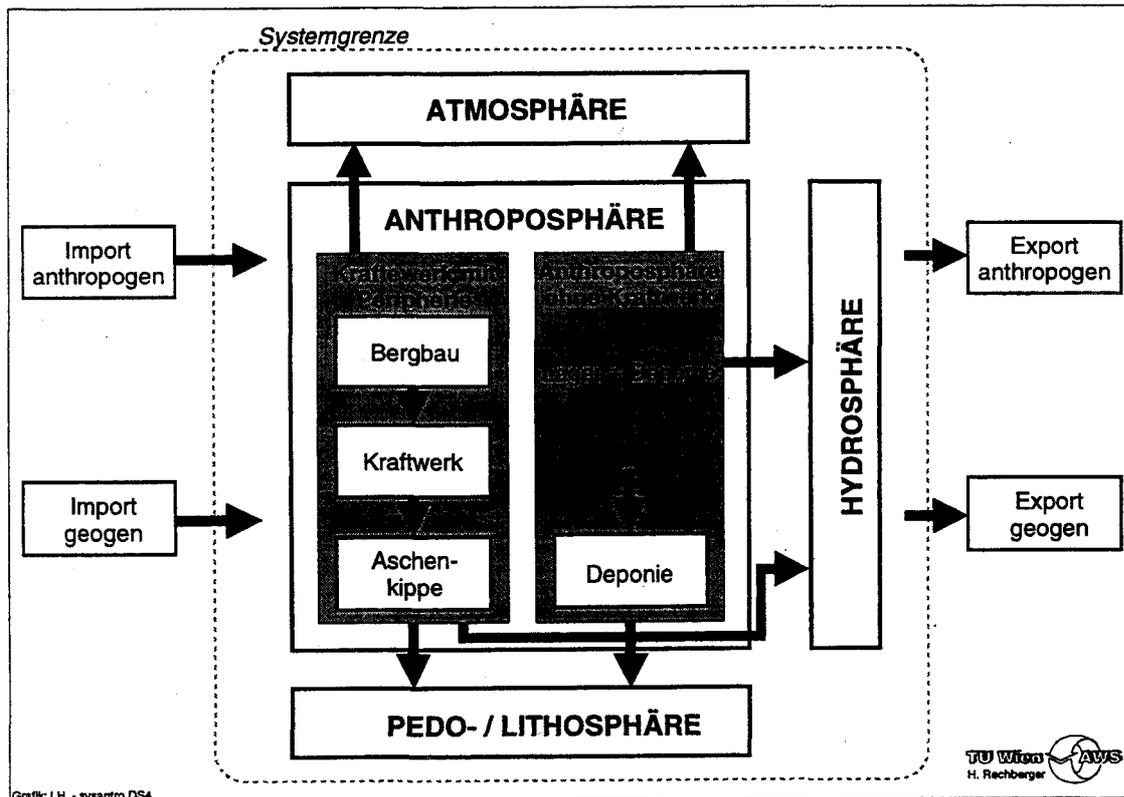
*Abb.K-1: Vereinfachte Güterbilanz für Kraftwerk mit Peripherie
(ohne Frischluft- und Frischwasserzufuhr)*



Hierfür wurde zunächst der Weg der Braunkohle "von der Wiege bis zur Bahre", beginnend mit der Gewinnung im Tagebau, über die Verstromung im Kraftwerk, bis zur Ablagerung der anfallenden Aschen verfolgt.

In einem zweiten Schritt wurden Ansätze entwickelt, um das Kraftwerk mit Peripherie stofflich in einen regionalen Kontext zu stellen. Abb.K-2 zeigt eine allgemeine Darstellung der Stoffflüsse des Kraftwerkes einschließlich seiner vor- und nachgeschalteten Prozesse und die Einbindung in die übrigen anthropogenen und natürlichen Stoffflüsse der Region.

Abb.K-2: Vereinfachte Darstellung der Stoffflüsse durch die Region



Je nach Element ist der Beitrag des Kraftwerkes zum Gesamtstoffhaushalt der Region unterschiedlich groß. Unabhängig von den vorgeschriebenen Grenzwerten werden somit jene Probleme in der Region ersichtlich, für die das Kraftwerk in erster Linie Verantwortung trägt. Andererseits kann aber auch klar beantwortet werden, wo eine Maßnahme des betreibenden Unternehmens nur eine marginale Wirkung bezüglich der Stoffflüsse und -lager der Region zeigt, und deshalb andere Akteure effizienter agieren können.

Die erste Herausforderung dieser Arbeit war es, einen Ansatz zu finden, um die einzelnen Bereiche "Bergbau", "Kraftwerk" und "Aschenkippe" quali- und quantitativ zu einem Gesamtsystem zu verknüpfen; dies kann erst dann gelingen, wenn die einzelnen Teile zuvor in einen aussagekräftigen, die Wirklichkeit am besten widerspiegelnden zeitlichen Kontext gebracht werden.

Um ein möglichst objektives Bild für den Bereich "Bergbau" entwickeln zu können, wurde von der gesamten prognostizierten Lebensdauer des Tagebaues ausgegangen; aus der Summe der bereits gewonnenen und noch dort lagernden Kohle- und Abraummengen wurde auf ein "mittleres" Förderjahr umgerechnet; diese Vorgangsweise hat den Vorteil, daß das sich zeitlich stets verändernde Abraum/Kohleverhältnis mitberücksichtigt werden kann.

Für die zeitliche Begrenzung des Bereiches "Kraftwerk" mußte ein anderer Weg entwickelt werden. Um dem "mittleren" Förderjahr des Bereiches "Bergbau" zu entsprechen und gleichzeitig einer möglichst langfristigen Betrachtungsweise Rechnung zu tragen, wurden für das Kraftwerk Zeitreihen einiger Betriebsdaten wie z.B. Kohledurchsatz, Emissionen und Energiedaten aus den Jahren 1987 bis 1993 herangezogen. Diese Daten beinhalten sowohl die für einen typischen Betrieb des Kraftwerkes charakteristischen An- und Abfahrvorgänge als auch die Voll-, Teil- und Mindestlastbetriebszustände. Zur Definition eines "Normalbetriebsjahres" des Kraftwerkes, das mit dem "mittleren" Förderjahr des Bergbaues in einen zeitlichen Zusammenhang gebracht werden kann, wurden die vorliegenden Jahresdaten durch die Anzahl der Betriebsstunden normiert und anschließend gemittelt; auf dieser Basis wurde ein "Normalbetriebsjahr" von 4.000 Betriebsstunden, für die das Kraftwerk ausgelegt wurde, definiert. Es ist ebenso möglich, das "Normalbetriebsjahr" mit einer geringeren Jahresbetriebsstundenzahlen zu definieren, um eventuell kürzere Einsatzperioden des Kraftwerkes zu berücksichtigen. Diese Vorgangsweise hat den Vorteil, daß sie die tatsächlichen Betriebszustände des Kraftwerkes genauer wiedergibt als eine Einzelbilanzierung von Teil- bzw. Vollastbetrieb.

Der Betrachtungszeitraum für den Bereich "Aschenkippe" wurde auf analoge Weise dem "mittleren" Förderjahr des Bergbaues und dem "Normalbetriebsjahr" des Kraftwerkes angepaßt.

Die zweite Herausforderung dieser Machbarkeitsstudie bestand darin, Methoden zu entwickeln, um das Kraftwerk inkl. seiner Peripherie quantitativ und qualitativ bezüglich Umweltbelastung und Ressourcennutzung mit der "Region" zu verknüpfen. Ein systemtheoretisch begründbarer Ansatz für die Definition des Bilanzraumes "Region" mußte daher in nachvollziehbarer Weise von den Stoff- und Energieströmen des Kraftwerkes ausgehen. Deshalb erschienen die beiden folgenden Regionsdefinitionen als besonders zielführend:

- die "produktbezogene" Region, deren Größe anhand derjenigen Einwohnerzahl definiert ist, welche vom Kraftwerk mit dem Produkt "Strom" versorgt werden kann,
- die "stoffbezogene" Region, die je nach Fragestellung den Einflußbereich des Kraftwerkes auf Luft, bzw. Wasser und Boden umfaßt und deshalb je nach dem von unterschiedlicher Größe sein kann.

Diese Regionen sind von unterschiedlicher geographischer Ausdehnung. Sie lassen sich einerseits anhand von Stromkonsumdaten und andererseits aufgrund ihrer hydrologischen bzw. meteorologischen Eigenschaften und den Kenntnissen der Energie-, Güter- und Stoffflüsse des Kraftwerkes definieren.

Für die praktische Durchführung einer Energie- und Stoffflußstudie bedeutet dies, daß für die "produktbezogene" Region österreichische Durchschnittswerte herangezogen werden, mit Hilfe derer der Anteil der Stoffflüsse des Kraftwerkes inkl. Peripherie zu den Stoffflüssen der Region in bezug gesetzt werden kann. Eine erste grobe Abschätzung des Anteils des Kraftwerkes an den Gesamtemissionen der produktbezogen definierten Region konnte auf Basis der vom Kraftwerksbetreiber zur Verfügung gestellten Daten bereits durchgeführt werden; er beträgt für NO_x und Staub rund 10%, für CO 1%, für SO_2 40% und für CO_2 70%. Weiters zeigt sich, daß die Stoffflüsse von Selen und Quecksilber einer eingehenderen Untersuchung bedürfen. Die im Karlschacht 2 verkippte Asche stellt ein beträchtliches anthropogenes Lager von Schwermetallen dar; vor allem die Elemente Arsen, Selen und Quecksilber sind im Vergleich zur Erdkruste signifikant angereichert. Es ist daher wichtig zu untersuchen, inwieweit diese Elemente dort in immobilisierter Form vorliegen.

Im Gegensatz dazu wird bei den stoffbezogen definierten Regionen vom unmittelbaren Einwirkungsbereich des Kraftwerkes auf die Umweltkompartimente ausgegangen. Für die Hydrosphäre bietet sich als Region das hydrologische Einzugsgebiet der Vorfluter an. Für die Kompartimente Atmosphäre und Pedo-/Lithosphäre besteht die Möglichkeit, mit Hilfe von Ausbreitungsmodellen den Einwirkungsbereich des Kraftwerkes festzulegen. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß je nach bilanziertem Stoff die Größe der zugehörigen atmosphärischen und bodenbezogenen Region unterschiedlich gewählt werden muß. Beispielsweise hängt die Ausbreitung der atmosphärischen Inhaltsstoffe von der durch die Teilchengröße bedingten Aufenthaltszeit ab: Aerosole, d.h. Teilchen $< 0,2\mu\text{m}$ haben eine mittlere Aufenthaltszeit von einer Woche und verteilen sich damit über eine Region von 1 Mio km^2 , Sedimentstäube $> 100\mu\text{m}$ dagegen setzen sich schnell ab und entsprechen einer rund 25.000 mal kleineren Region. Anzumerken ist dabei, daß es für die Bestimmung der Grenzen einer stoffbezogenen Region keine wissenschaftlich exakten und somit vollständig befriedigende Ausbreitungsmodelle gibt. Bislang können Einflüsse von industriellen Anlagen auf ihre Umwelt nur durch aufwendige Messungen quantifiziert werden. Trotzdem ist es möglich, mit Hilfe der Methodik der Stoffflußanalyse den Beitrag des Kraftwerkes zu den Stoffflüssen der Umweltkompartimente einer definierten Region festzulegen. Da diese geographischen Bilanzräume meist nicht mit den statistischen Erhebungseinheiten (politischer Bezirk) übereinstimmen, gestaltet sich die Datenerhebung erheblich aufwendiger.

Die Ermittlung der geogenen Daten bleibt einem auf dieser Machbarkeitsstudie aufbauenden Folgeprojekt vorbehalten. Mit den zur Verfügung stehenden Mitteln konnte der Kraftwerksanteil an den Stoffflüssen in die Umweltkompartimente noch nicht abgeschätzt werden. Lediglich eine erste Berechnung der durch das Kraftwerk verursachten SO₂-Immissionen nach ÖNORM M9440 wurde angestellt und darauf basierend der Ansatz zur Bestimmung der "stoffbezogenen" Region für SO₂ entwickelt.

Mit der vorliegenden Machbarkeitsstudie konnte gezeigt werden, daß es möglich ist, das kalorische Kraftwerk Voitsberg 3 in einem weiterführenden Projekt energetisch und stofflich zu bilanzieren und unter Anwendung der vorgestellten Methodik auf objektive Art und Weise mit seiner natürlichen und vom Menschen geschaffenen Umgebung zu verknüpfen und bezüglich der Stoffflüsse zu vergleichen. Die hierfür zu leistende Arbeit stellt weiters einen wertvollen Beitrag zur Erstellung einer betrieblichen und ökologischen Stoffbuchhaltung dar, wie sie im Nationalen Umweltplan gefordert wird, und sie dient zusätzlich als wesentliche Vorarbeit für ein zukünftiges Öko-Auditing.

System Analysis and Material Balance of a Thermal Power Plant - Abstract

The concept of a *regional, environmentally sound material management* is a new challenge for a company management that takes into consideration environmental aspects. The company should examine its contribution to the region in regard to material and energy flows and it should produce a permanently high net product with a minimal damage to the environment.

The present *feasibility study* analyses the possibilities of examining and presenting material and energy aspects of the interaction between the power plant and the region.

A method has been worked out to establish an overall system called *Power Plant and its Periphery* which combines the thermal power plant Voitsberg 3, the supplying coal mine Oberdorf, and the ash dumping site Karlschacht 2.

One goal of this study was therefore, to find a way of combining the different steps "mining", "power plant", and "ash dumping" to an overall system considering both qualitative and quantitative aspects.

Another goal of the present feasibility study was to develop methods to consider the impacts of the power plant and its periphery to the environment and the use of resources. For this purpose the region is analysed from two different points of view:

-the region defined by the "product"; its size is defined by the number of inhabitants the power plant supplies with the product "electricity".

-the region defined by the area, in which the specific impacts of the power plant on air, water, soil etc. have to be examined; its size will therefore vary considerably according to the subject of investigation.

Based on data provided by the power plant operators a rough estimate could be made to what extent the power plant is responsible for the air pollutant emissions in the region defined by the "product". According to these data the part of pollution caused by the power plant amounts to 10% for NO_x and particulate matter, to 40% for SO₂, and to 70% for CO₂. Furthermore, it can be seen, that the material fluxes of selenium and mercury have to be surveyed in more detail.

The ashes dumped in Karlschacht 2 contain a large amount of heavy metals, mainly arsenic, selenium, and mercury. These elements occur in a much higher concentration than in the earth crust. Therefore it is of great importance to examine to what extent these elements are immobilized there.

The present feasibility study has shown that it is possible to establish an energy and material balance of the thermal power plant Voitsberg 3. It has also made clear that, by using the presented method, it is possible to combine the power plant with its natural and man-made environment. This study is not only a useful preparation for a future eco-audit but also an important contribution for establishing accounts for material fluxes, as required by the Austrian National Environmental Plan.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Zielsetzung	2
3. Fragestellung	3
4. Vorgehen zur Erstellung einer Machbarkeitsstudie	4
4.1 Kohlebergbau	4
4.1.1 Systemanalyse	6
4.1.2 Grobe Abschätzung von Massen-, Volumen- und Energiebilanz	8
4.1.3 Pauschale Bilanz eines ausgewählten Stoffes als Grundlage für die Erstellung einer Machbarkeitsstudie	9
4.2 Kraftwerk	10
4.2.1 Systemanalyse	11
4.2.2 Grobe Abschätzung von Massen-, Volumen- und Energiebilanz	14
4.2.3 Pauschale erste Bilanzierung ausgewählter Stoffe als Grundlage für die Erstellung einer Machbarkeitsstudie	20
4.3 Aschenkippe	21
5. Vorschlag für ein methodisches Vorgehen zur Erstellung einer Massen-, Volumen-, Energie- und Stoffbilanz des Kraftwerkes einschließlich seiner Peripherie	23
6. Vorgehen für eine Einbettung des Kraftwerkes in die Region	35
6.1 Ansätze zur Auswahl der Region	35
6.1.1 Produktbezogener Ansatz	35
6.1.2 Stoffbezogener Ansatz	37
6.1.3 Verknüpfung der Ansätze	38
6.2 Systemanalyse der Region	38
6.3 Bestimmung der wichtigsten Anteile von Kraftwerk und Peripherie an den Flüssen der Region	41

6.4	Erste Abschätzung der Anteile des Kraftwerkes an den Stoffflüssen der "produktbezogenen" Region.....	44
6.5	Erste Abschätzung der Region für SO ₂ im Sinne des "stoffbezogenen" Ansatzes	54
6.6	Darstellung der "hydrologischen Region"	62
7.	Vorgehen zur Erstellung einer Stoffflußstudie auf der Grundlage der Machbarkeitsstudie (weiteres Vorgehen)	64
8.	Beantwortung der Fragen im Sinne einer Zusammenfassung.....	66
9.	Literaturverzeichnis.....	70

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb.K-1: Vereinfachte Güterbilanz für Kraftwerk mit Peripherie	i
Abb.K-2: Darstellung der Stoffflüsse durch die Region	ii
Abb.1: Lagerstättenprofil der Kohlenmulde Oberdorf.....	5
Abb.2: Systemanalyse des Bergbaues	7
Abb.3: Massenbilanz des Bergbaues.....	8
Abb.4: Volumenbilanz des Bergbaues	8
Abb.5: Energiebilanz des Bergbaues	9
Abb.6: Kohlenstoffbilanz des Bergbaues.....	10
Abb.7: Systemanalyse für die Güter- und Stoffbilanz des Kraftwerkes	13
Abb.8: Massenbilanz für das Kraftwerk	16
Abb.9: Volumenbilanz für das Kraftwerk.....	17
Abb.10: Energiebilanz des Kraftwerkes für eine Vollaststunde	18
Abb.11: Verteilung des Kohlenstoffs auf die Produkte des Kraftwerkes, in %....	20
Abb.12: Verteilung des Schwefels auf die Produkte des Kraftwerkes, in %	21
Abb.13: Systemanalyse des gesamten Kraftwerkes einschließlich seiner Peripherie	26
Abb.14: Vorläufige Massenbilanz für Kraftwerk & Peripherie.....	28
Abb.15: Vorläufige Volumenbilanz für Kraftwerk & Peripherie	29
Abb.16: Abbildung der "produktbezogenen" Region	37
Abb.17: Systemanalyse der Region.....	40
Abb.18: Abhängigkeit der Maxima von der Windgeschwindigkeit.....	56
Abb.19: berechnete SO ₂ -Konzentration am Boden.....	57
Abb.20: Emissionssituation bei Bodeninversion	58
Abb.21: Emissionssituation bei Höheninversion	59
Abb.22: Ungestörte Ausbreitung (Gaußmodell)	59
Abb.23: Skizze zur Abschätzung der SO ₂ -Konzentration bei Höheninversion ...	61
Abb.24: Darstellung der "stoffbezogenen" Region für SO ₂	62
Abb.25: Darstellung der hydrologischen Region	63

Tabellenverzeichnis

		Seite
Tab.1:	Güterflüsse des Kraftwerkes (Vollast)	14
Tab.2:	Prozeß- und Stoffdaten für die Energiebilanz des Kraftwerkes	19
Tab.3:	pauschale Kohlenstoffbilanz des Kraftwerkes	20
Tab.4:	pauschale Schwefelbilanz des Kraftwerkes	21
Tab.5:	ausgewählte Prozesse und Güter	25
Tab.6:	Zeitreihen für einige Betriebsdaten	31
Tab.7:	Erzeugungs- und Emissionsdaten	32
Tab.8:	Gegenüberstellung der Literaturdaten	34
Tab.9:	Vorlage für eine stoffspezifische Liste für das Element Kohlenstoff	43
Tab.10:	Vergleich der an das Gut Kohle gebundenen Stoffflüsse mit den Stoffflüssen durch den privaten Haushalt	45
Tab.11:	Verteilung der Spurenelemente auf die Outputgüter des Kraftwerkes ...	46
Tab.12:	Abschätzung der vom Kraftwerk in 33 Jahren verursachten Immissionen	47
Tab.13:	Sensitivitätsanalyse für die Einflußfaktoren Transferkoeffizient und Stoffkonzentration	48
Tab.14:	Vergleich der Emissionen Kraftwerk - "produktbezogene" Region	49
Tab.15:	CO ₂ -Substitution durch Fernwärmeauskopplung (brutto)	51
Tab.16:	Bezogene CO ₂ -Emissionen der Haushalte	52
Tab.17:	SO ₂ -Substitution durch Fernwärmeauskopplung (brutto)	52
Tab.18:	Vergleich der rückverkippten Asche mit der Erdkruste	53
Tab.19:	Abhängigkeit der Maxima von der Windgeschwindigkeit	56
Tab.20:	Immissionsgrenzwerte für SO ₂	57
Diagramm 1:	Vergleich der Emissionen Kraftwerk - "produktbezogene" Region.	49
Diagramm 2:	Darstellung des Luftbedarfes von Kraftwerk und "produktbezogener" Region	50

1. Einleitung

Um zukünftige Umweltbelastungen oder Rohstoffverknappungen frühzeitig zu erkennen und effizient zu verhindern, müssen Methoden zur Erfassung und Steuerung von Stoffflüssen entwickelt werden. Stoffflüsse sollen so gesteuert werden, daß sie langfristig umweltverträglich sind und eine optimale und nachhaltige Nutzung der Ressourcen gewährleisten. Die Strategie des umweltverträglichen Stoffhaushaltes ist heute soweit ausgearbeitet, daß sie in Betrieben, Regionen und global zur Analyse und Lösung unterschiedlichster Probleme angewendet werden kann, beispielsweise zur Setzung von Prioritäten bei Maßnahmen zur frühzeitigen Verhinderung des Anstiegs der Nitratkonzentration im Trinkwasser, zur Prüfung der Umweltverträglichkeit von Entsorgungsanlagen und Deponien, zur umweltgerechten Gestaltung von Produkten und Produktionsverfahren usw.

Für Unternehmen bedeutet die Strategie des umweltverträglichen Stoffhaushaltes eine neue Herausforderung. In der Vergangenheit bestanden die umwelttechnischen Ziele im Einhalten der gesetzlich geforderten Grenzwerte. Da diese Grenzen laufend enger gesetzt wurden, sah sich der Unternehmer dauernd der Entwicklung hinterherlaufen. Ein Ausweg aus dieser Situation bietet sich einem Unternehmen dadurch, daß es versucht, sich in den regionalen Kontext zu stellen, und seinen Beitrag zur Region und deren Umwelt in stofflicher, energetischer, wirtschaftlicher und sozialer Hinsicht darstellt. Im vorliegenden Projekt "Systemanalyse und Stoffbilanz eines kalorischen Kraftwerkes-SYSTOK" kann noch nicht soweit gegangen werden, auch ökonomische und sozialwissenschaftliche Themen miteinzubeziehen. Das Projekt soll die Stoff- und Energieflüsse des Braunkohlekraftwerkes Voitsberg 3 darstellen und sie in Beziehung setzen einerseits zu den Stoffflüssen des Braunkohlebergbaues und den übrigen, vom Menschen verursachten Emissionen und andererseits zu den natürlichen Stoffflüssen der Region.

In diesem Projekt soll nun eine Analyse des gesamten Systems vom Braunkohleabbau bis zur Abgabe von elektrischer Energie durchgeführt werden. Dieses System soll in den regionalen Kontext hineingestellt werden, damit Fragen der folgenden Art beantwortet werden können: Welchen Einfluß hat das Kraftwerk (inklusive Kohleabbau) auf die Ressourcen der Region? Wo werden Rohstoff- und Schadstoffpotentiale abgebaut, wo welche aufgebaut, und wie verhalten sich diese Veränderungen gegenüber geogenen Änderungen in der Region? Welches sind die wichtigsten Quellen, Transportwege und Transformationen, sowie die letzten Senken von Stoffen, die entweder als Hauptbestandteile oder als wichtige Spurenstoffe durch das System und durch die Region fließen? Welche langfristigen Entwicklungen und Folgen sind durch die Stoffflüsse und Lageränderungen zu erwarten? Wo sind Schwachstellen bezüglich langfristiger Umweltbelastungen und Ressourcenverknappungen, und mit welchen Maßnahmen können diese effizient eliminiert werden? Die Antworten auf diese Fragen sollen in den Umweltbericht des Unternehmens integriert werden und als Grundlagen für ein zukünftiges Öko-Auditing-Verfahren herangezogen werden.

Die Bearbeitung des Projektes erfolgt in *zwei Schritten*: zunächst wird in einer Machbarkeitsstudie abgeklärt, ob und wie das Projekt durchführbar ist; hierbei wird in einer Systemanalyse das hochkomplexe System "Braunkohlekraftwerk" mit seiner Peripherie auf die wesentlichen Prozesse, Güter und Stoffe reduziert werden. Eine grobe Abschätzung der Güter- und Stoffflüsse erlaubt, die für die Bilanzen und den Vergleich mit der Region wichtigsten Größen zu finden, und die wesentlichen Unsicherheiten (fehlende oder mangelhafte Daten, prinzipiell nicht erhebbare Daten usw.) zu identifizieren. In einer zweiten Bearbeitungsphase, die nicht mehr in der vorliegenden, sondern in einer nächsten Studie stattfindet, werden Güter- und Stoffflüsse quantitativ untersucht. Anhand eines konkreten Meßprogrammes soll mit möglichst wenigen Messungen eine Stoff-, Energie- und Volumenbilanz des Kraftwerkes durchgeführt werden, und die Beziehung zwischen dem Bergwerk, dem Kraftwerk und der Region hergestellt werden. Die Machbarkeitsstudie wird durch das Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft der technischen Universität Wien erarbeitet; das Umweltbundesamt und die Verbundgesellschaft unterstützten die Studie und sind teilweise direkt daran beteiligt. Die eventuell folgende Detailstudie wird erst nach Abschluß und Evaluation der Machbarkeitsstudie beschlossen.

2. Zielsetzung

Das Ziel des vorliegenden Projektes ist die Erstellung einer Machbarkeitsstudie zum Thema "Energie-, Stoff- und Volumenbilanz des Kraftwerkes Voitsberg 3 von der Kohlegewinnung bis zur Verwertung inklusive Ablagerung der Produkte des thermischen Kraftwerkes". Anhand einer Systemanalyse soll die gesamte Prozeßkette vom Kohleabbau, dem Kohlenlager, der Stromerzeugung bis zur Verwertung und Endlagerung der Rückstände untersucht werden. Als Methodik zur Systembeschreibung soll die Stoffflußanalyse verwendet werden. Sie definiert die wichtigsten Prozesse (Quellen, Transporte und Transformationen, Senken), Güter (d.h. handelbare Substanzen mit positivem und negativem Wert wie Braunkohle, Kalziumkarbonat oder Abgase) und Stoffe (Elemente oder chemische Verbindungen). Das Ziel der Analyse besteht darin, das hochkomplexe System Braunkohlekraftwerk mit seiner Peripherie soweit zu vereinfachen und auf die wesentlichen Elemente zu reduzieren, daß es in einer zweiten Phase quantitativ untersucht werden kann. Der Aufwand für eine solche Untersuchung soll sowohl hinsichtlich der Kosten als auch der technischen Durchführbarkeit abgeschätzt werden, d.h., es werden die für die zweite Phase vorgesehenen Versuche geplant und deren Kosten abgeschätzt.

3. Fragestellung

Folgende Fragen sollen untersucht werden:

1. Welches sind die wichtigsten Güter, Prozesse und Stoffe, die für eine Systemanalyse des Kraftwerkes und des Kohleabbaus in Hinblick auf langfristige regionale Umweltverträglichkeit und optimale Ressourcennutzung berücksichtigt werden müssen? Welche Indikatoren sind auszuwählen, um Fragen der Energiebilanz, der Massen- bzw. Stoffbilanz und der Volumenbilanz zu beantworten?
2. Wie muß das System räumlich und zeitlich begrenzt werden? Dies beinhaltet sowohl die Frage nach der Region, die je nach betrachtetem Gut und Stoff unterschiedlich beantwortet werden muß, als auch diejenige nach dem Bilanzierungszeitraum. Jedenfalls sollen vor allem für die Frage der Verwertung und Deponierung der Reststoffe auch lange Zeiträume in die Betrachtung miteinbezogen werden.
3. Wie sieht eine erste quantitative Abschätzung ausgewählter Güter- und Stoffbilanzen des Kraftwerkes einschließlich der Kohlegewinnung aus? Welche Folgerungen in Bezug auf Stärken und Schwächen des Systems lassen sich daraus ableiten? Die Abschätzung soll ausschließlich aufgrund von vorhandenen Daten ohne zusätzliche Laborarbeiten erfolgen.
4. Welche Kenntnisse sind notwendig über die Region? Hier sind einerseits weitere industriell-gewerbliche und landwirtschaftliche Prozesse sowie die öffentlichen und privaten Haushaltungen im Sinne einer Regionalstudie übersichtsmäßig in die Betrachtungen miteinzubeziehen. Andererseits sind die geogenen Referenzzustände der Region, insbesondere der Wasser- und Lufthaushalt und der Bodenzustand zu berücksichtigen.
5. Wie sieht ein konkretes Untersuchungsprogramm aus für eine nachfolgende quantitative Stoff-, Energie- und Volumenbilanz des Kraftwerkes und ihre Einbettung in die Region? Welche Güter, Prozesse und Stoffe müssen wie und wo in welchem Rhythmus untersucht werden? Welches sind die Kosten für die Bilanzen? Wie können die beiden Systeme "Kraftwerk" und "Region" miteinander quantitativ bezüglich Umweltbelastung und Ressourcennutzung in Beziehung gesetzt werden?
6. Wie können die Resultate für ein Öko-Audit und für ein betriebliches Abfallwirtschaftskonzept verwendet werden?

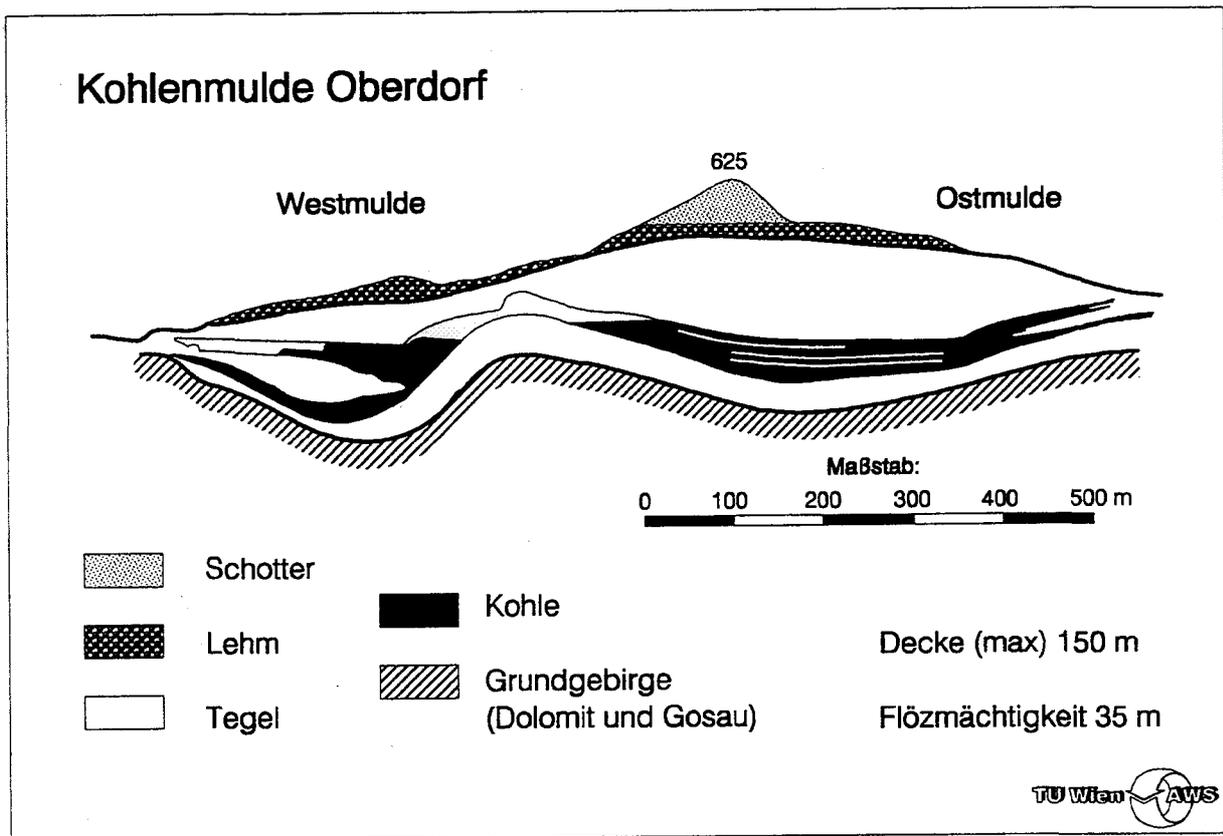
4. Vorgehen zur Erstellung einer Machbarkeitsstudie

In dieser Machbarkeitsstudie liegt das Schwergewicht in der methodischen und inhaltlichen *Vorbereitung* einer Energie-, Stoff- und Volumenbilanz des Kraftwerkes und der Kohlegewinnung. Es soll gezeigt werden, was eine Systemanalyse und eine Energie-, Stoff- und Volumenbilanz im Hinblick auf Fragen der regionalen Umweltverträglichkeit und der optimalen Ressourcennutzung ist, wie man solche Bilanzen für das Kraftwerk und seine Peripherie erstellt, und welche Aussagen damit gemacht werden können. Soweit möglich werden anhand von existierenden Daten pauschale Bilanzen für einzelne ausgewählte Stoffe abgeschätzt. Die eigentlichen, wesentlich aufwendigeren numerischen Bilanzen, zu deren Erstellung sicherlich zusätzliche Analysen notwendig sein werden, sind erst in einem folgenden Projekt vorgesehen. In diesem Kapitel werden zunächst der zu bilanzierende Braunkohlebergbau der Kohlenmulde Oberdorf, die das Kraftwerk mit Brennstoff versorgt, und das zu bilanzierende Kohlekraftwerk Voitsberg 3 beschrieben, und die beiden Systeme in Hauptprozesse unterteilt. Die zur Untersuchung ausgewählten Stoffe und Güter werden in der Folge aufgeführt und diese Auswahl begründet. Schließlich werden eine Systemanalyse und eine provisorische Güter- Volumen- und Energiebilanz, basierend auf zur Verfügung gestellten Daten, erstellt.

4.1 Kohlebergbau

Im größten Kohlenvorkommen Österreichs, dem Tertiärbecken von Köflach-Voitsberg in der Steiermark, befinden sich zehn bis zu 300m tiefe kohleführende Mulden, die erstmals zu Mitte des vorigen Jahrhunderts exploratorisch erschlossen wurden. Der zunächst von einer größeren Anzahl von Kohlewerken geführte Abbau wurde bis zum Jahr 1954 vollständig in der GKB (Graz-Köflacher Eisenbahn- und Bergbaugesellschaft) zusammengeführt. Die Gesellschaft war 1991 als größtes österreichisches Kohlenbergbauunternehmen mit 60,4% an der gesamtösterreichischen Kohlenförderung beteiligt. Nach der Stilllegung der letzten Zeche Karlschacht im Juli 1990 erfolgt die Kohlenförderung ausschließlich in den Tagebauen der Oberdorfer-Lagerstätte, deren geologisches Profil in der folgenden Abbildung dargestellt ist:

Abb.1: Lagerstättenprofil der Kohlenmulde Oberdorf [Gössler, 1984]



Die Oberdorfer Kohlenmulde, östlich des Ortsgebietes Bärnbach gelegen, erstreckt sich über ein Areal von 2 km². Die im Grundriß kreisförmige Lagerstätte teilt sich in eine West- und in eine Ostmulde in der jeweils ein Tagebau existiert [Mauschitz 1993].

Das Kohlenvorkommen ist im Laufe der Sedimentauffüllung eines prätertiären Beckens vor ca. 15 Millionen Jahren im Miozän entstanden. Zwei unterschiedliche Vegetationsphasen haben zur Entstehung zweier unregelmäßig ausgebildeter Kohlenflöze geführt. Die mit einer 300m starken Deckschicht überlagerten Flöze lassen eine Mächtigkeit von bis zu 35m erkennen und bilden ein förderbares Braunkohlelager von mehr als 31 Millionen Tonnen. Das Abraummateriale wird insgesamt auf 135 Mio m³ geschätzt und besteht vornehmlich aus Wechsellagerungen von Tonen und Sanden (80%), aus Schotter (12%) und Lehm (8%). Die von tonigen Zwischenlagerungen durchzogenen Kohlenflöze weisen große Schwankungen in ihren Qualitätsmerkmalen auf. Bei einem Kohlenstoffgehalt von 27 bis 35 Gew%, einem Aschegehalt von 10 bis 33 Gew% und einem Wassergehalt von 30 bis 40 Gew% ergibt sich ein Heizwert von 8,4 bis 12,6 MJ/kg. Wegen des geringen Heizwertes ist es aus ökonomischer und ökologischer Sicht sinnvoll, die Braunkohle in einem unmittelbar in Zechennähe gelegenen Kraftwerk zur Stromerzeugung zu verwenden.

Die Westmulde der Lagerstätte war 1991, nach 13-jähriger Kohlegewinnung, praktisch ausgekohlt, während im Ostsektor von 1983 an bis heute wechselweise Abraum und

Kohle gewonnen wird. Der Kohlevorrat soll unter Beibehaltung der heutigen Abbaurate bis zum Jahr 2008 reichen.

Als Abbaugeräte finden Schaufel- und Hydraulikbagger Einsatz. Der Bergetransport erfolgt sowohl in Schwerlastkraftwagen, als auch mit Gurtbandförderanlagen, die unterdessen in der Ostmulde eine Gesamtlänge von ca. 14 km erreicht haben.

4.1.1 Systemanalyse

Als räumliche Systemgrenze wurde das Kohlelagergebiet Oberdorf mit 2 km² Fläche gewählt. Um ein möglichst naturgetreues Bild für das System "Bergbau" zu entwickeln, wurde für die Ziehung der zeitlichen Systemgrenze aus der prognostizierten Gesamtlebensdauer von 32 Jahren der Kohlelagerstätte ein "mittleres" Förderjahr berechnet; dieses Vorgehen ermöglicht die Einbeziehung des schon bei der Erschließung der Lagerstätte gewonnenen Abraums in die Güter-, Volumen- und Stoffbilanz. Der ab 1977 bis zum heutigen Zeitpunkt in Oberdorf rückverkippte Abraum beträgt rund 10% des gesamten in diesem Zeitraum gewonnenen Abraums mit einem Volumen von rund 102 Mio m³; in Zukunft wird jedoch der gesamte Abraum in Oberdorf selbst rückverkippt. Auch das Volumen des in Oberdorf rückverkippten Abraums wurde anhand des "mittleren" Förderjahres berechnet. Die Dichte der Kohle wurde mit 1,32 t/m³ und die des Abraums mit 1,77 t/m³ angenommen.

Folgende Prozesse wurden gewählt:

1. Gewinnung, Transport und Rekultivierung

Gewinnung: Abbau von Kohle und Abraum

Transport: Beförderung von Kohle und Abraum zu den nachfolgenden Prozessen

Rekultivierung: Wiederherstellung des ursprünglichen Landschaftscharakters

2. Klassierung und Eigenlager

Klassieren: Absieben und Nachbrechen der Kohle

Eigenlager: Kohlenlager der GKB

3. Verkipfung

Verkipfung: Ablagerung des Abraumes

4. Lithosphäre

Lithosphäre: Bezeichnung für die bis in 1.200 km Tiefe reichende Gesteinshülle der Erde.

5. Tagebau Oberdorf

Tagebau Oberdorf: obertägiger Kohleabbau

Folgende Güter wurden gewählt:

1. Kohle

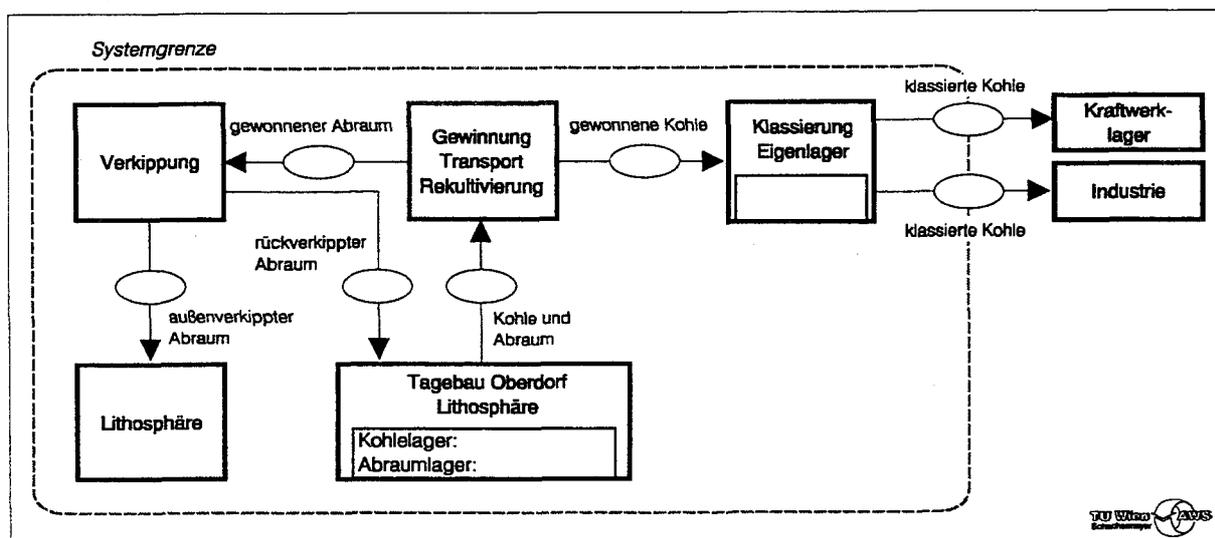
Kohle: geförderte Braunkohle

2. Abraum

Abraum: Material in dem die Kohle eingebettet ist

Die ausgewählten Stoffe werden in Kapitel 5. beschrieben.

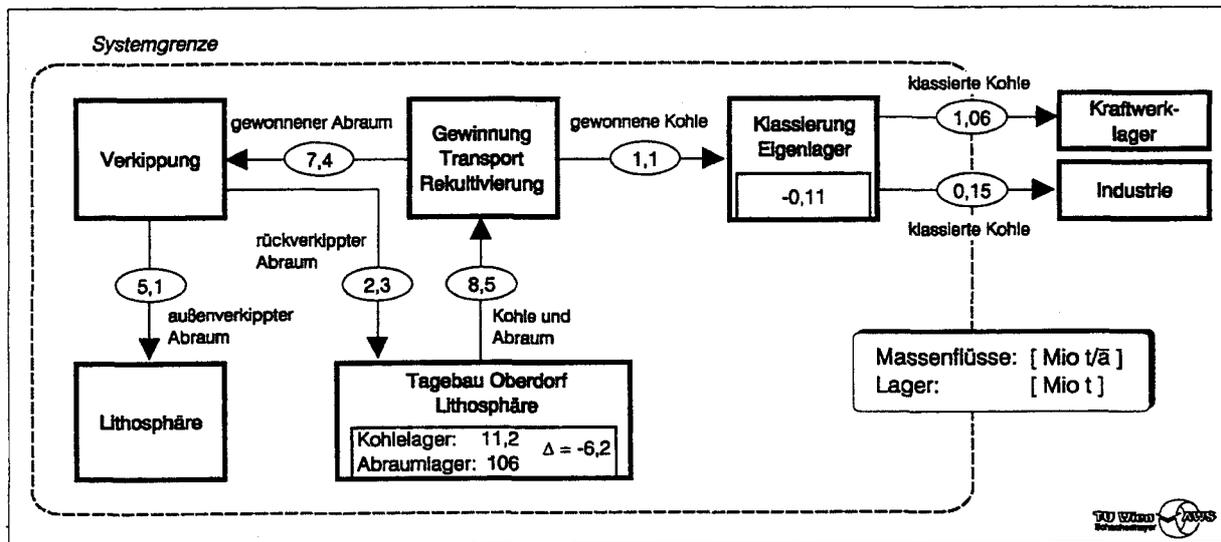
Abb.2: Systemanalyse des Bergbaues



4.1.2 Grobe Abschätzung von Massen-, Volumen- und Energiebilanz

Die folgende Abbildung stellt eine Abschätzung der im System Bergbau bewegten Massen dar.

Abb.3: Massenbilanz des Bergbaues



Die folgende Abbildung stellt eine Abschätzung der im System Bergbau bewegten Volumina dar.

Abb.4: Volumenbilanz des Bergbaues

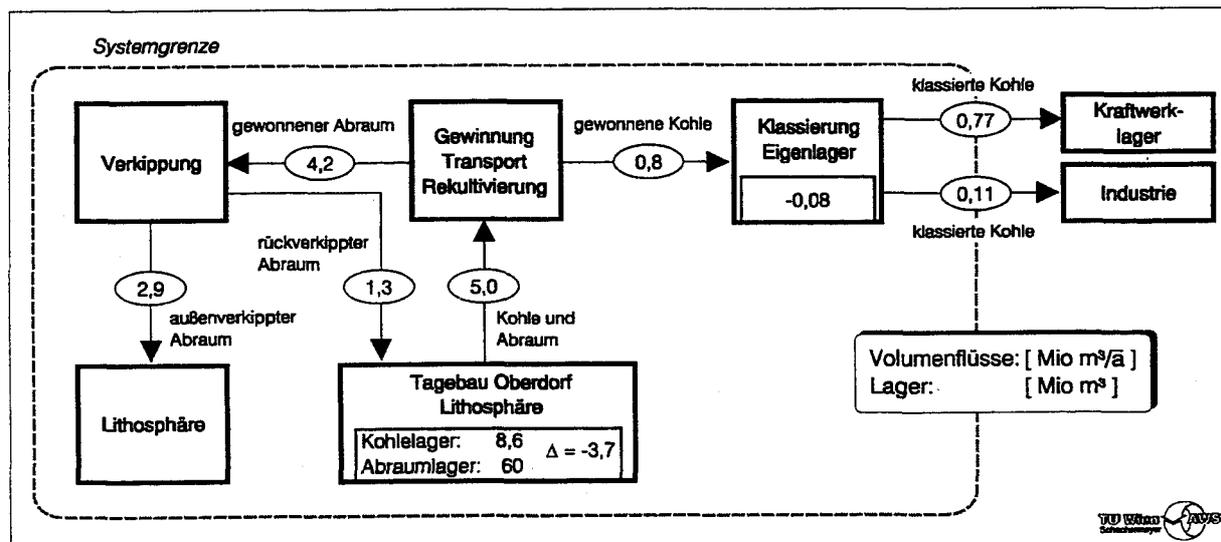
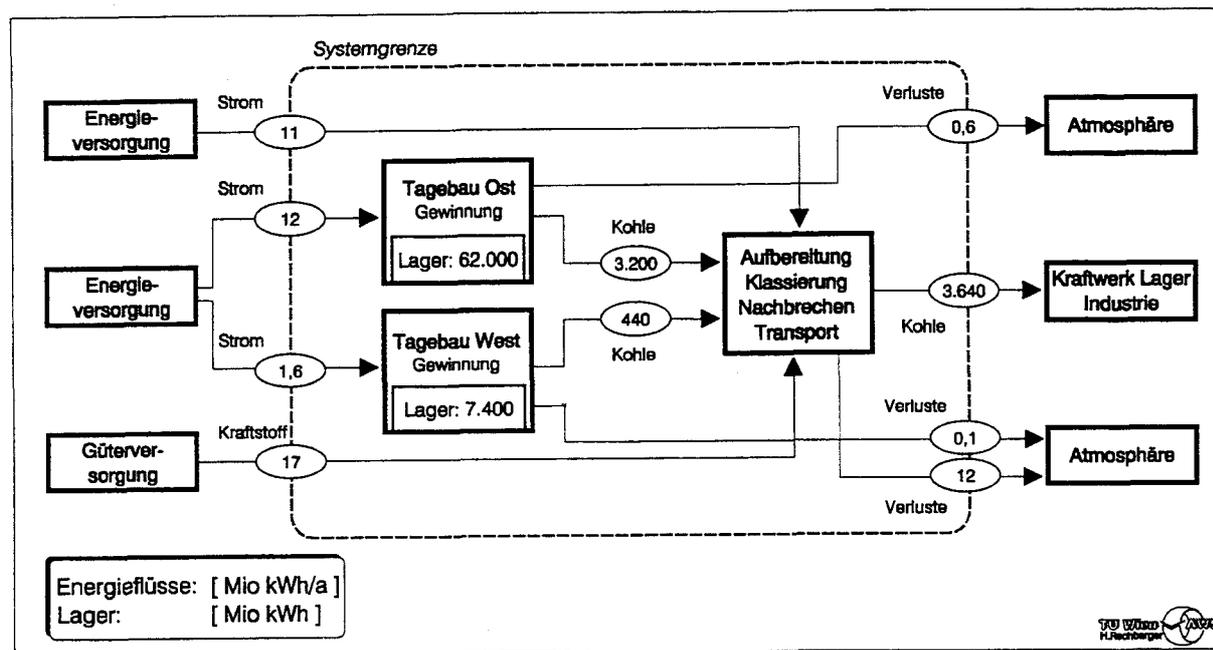


Abb.5: Energiebilanz des Bergbaues



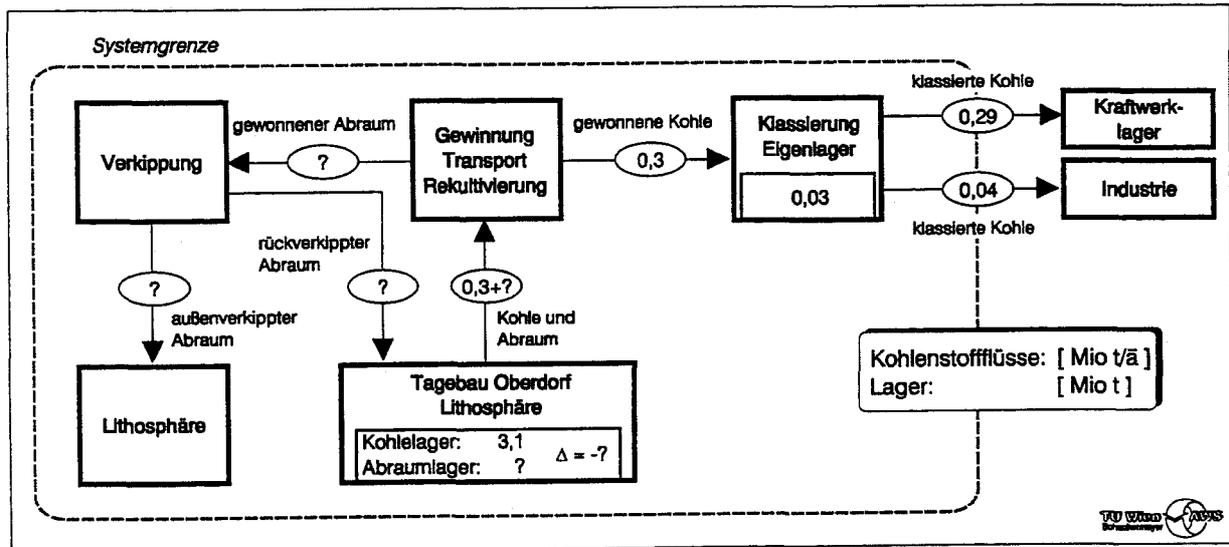
Das Ergebnis der Energiebilanz ist für das Jahr 1993 dargestellt. Definiert man, wie bei Kraftwerken üblich, einen energetischen Wirkungsgrad (Output/Input), so wird beim Bergbau in Voitsberg ca. das 87fache der eingesetzten Energie gewonnen. Diese Energie muß aber erst in industriell-technisch brauchbare Form umgewandelt werden. Die Energiebilanz Bergbau ist jedenfalls, wie nicht anders zu erwarten war, positiv.

⇒ Für ein weiteres Vorgehen: Um brauchbare Aussagen über den gesamten Zeitraum tätigen zu können, ist es nötig, die für das Jahr 1993 erhobenen Daten, auch für die vorangegangenen Jahre zu erheben, um das sich ändernde Abraum- zu Kohle-Verhältnis zu berücksichtigen. Wenn möglich, wird auch die zukünftige Nachsorge und Rekultivierung des Geländes mit in die Bilanz einbezogen.

4.1.3 Pauschale Bilanz eines ausgewählten Stoffes als Grundlage für die Erstellung einer Machbarkeitsstudie

In der folgenden Abbildung wird eine grobe Abschätzung des Kohlenstoffflusses durch das System Bergbau dargestellt. Der Elementfluß wird durch Multiplikation der Massenflüsse mit den jeweiligen Stoffkonzentrationen ermittelt. Als Kohlenstoffgehalt der Braunkohle wurde ein Mittelwert von 27,5 Gew % (Mitteilung Dr. Schöngrundner) eingesetzt. Der Kohlenstoffgehalt des Abraumes ist derzeit noch nicht bekannt; er dürfte aber um Größenordnungen unter demjenigen der Braunkohle liegen.

Abb.6: Kohlenstoffbilanz des Bergbaues



4.2 Kraftwerk

In den Jahren 1975/76 durchgeführte Untersuchungen ergaben, daß im Raum Oberdorf über 31-35 Millionen Tonnen förderbare Braunkohle lagern. Diese Kohle kann auf Grund ihres geringen Heizwertes nur von einer in der unmittelbaren Umgebung errichteten Großkraftwerksanlage wirtschaftlich und möglichst umweltschonend in elektrische Energie umgewandelt werden. Damit war die Voraussetzung für die Errichtung des Kohlekraftwerkes Voitsberg 3 gegeben. Der Beschluß des Aufsichtsrates der Österreichischen Draukraftwerke AG (ÖDK) zum Bau der Anlage erfolgte 1977, die Inbetriebnahme des Kraftwerksblockes Voitsberg 3 inklusive der ersten Stufe der Rauchgasentschwefelung erfolgte 1983. Es ist für rund 4.000 Vollaststunden pro Jahr ausgelegt, erbringt eine Leistung von 330 MW, und soll durch die Abgabe von Heißdampf an das Fernwärmenetz der STEWEAG den Hausbrand im Versorgungsbereich Voitsberg, Rosental und Köflach erheblich substituieren. Voitsberg 3 verfügte von Beginn an über eine Elektrofilteranlage mit einem Enstaubungsgrad von 99,85%, seit 1986 über eine Rauchgas-Naßentschwefelung (Verminderung der SO_2 -Anteile im Rauchgas von über 95%) und seit 1990/91 über eine nach dem SCR-Verfahren arbeitende DENOX-Anlage (garantierter Entstickungsgrad von 80%). Voitsberg 3 verfügt somit über eine dem letzten Stand der Technik entsprechende Rauchgasreinigungstechnologie [Festschrift Kohlekraftwerk Voitsberg 3]. Die bei der Kohleverbrennung entstehenden Produkte sind Grobmasse, Flugmasse, Gips aus der Rauchgasentschwefelung und gereinigtes Abgas.

4.2.1 Systemanalyse

Das System Kraftwerk, das in Wirklichkeit aus dutzenden von Prozessen besteht, wurde in sechs Hauptprozesse unterteilt, um ein informatives und übersichtliches Bild zu gewährleisten. Als räumliche Systemgrenzen wurden die Grenzen des Betriebsgeländes gewählt.

Die Wahl geeigneter zeitlicher Grenzen hingegen stellt sich als problematischer dar. Das System "Kraftwerk" befindet sich hinsichtlich der zu bilanzierenden Güter und Stoffe auf längere Sicht gesehen nicht im stationären Fließgleichgewicht. So ist es zwar ohne weiteres möglich, eine Volllaststunde zu bilanzieren, jedoch deckt dieser Betriebszustand nur etwa 87% der jährlichen Betriebsdauer ab. Während der restlichen 13% wird die Anlage - je nach Leistungsbedarf des Netzes - auf Teillast gefahren, wobei die recht häufigen Betriebsänderungen mit zahlreichen Anfahr- und Abfahrvorgängen verbunden sind. Trotzdem wurde für den Bilanzierungszeitraum eine Volllastbetriebsstunde gewählt, da die meisten zur Verfügung stehenden Prozeßdaten aus dem Volllastbetrieb stammen. In Kapitel 5 wird eine weitere Möglichkeit für die Wahl der zeitlichen Systemgrenzen dargestellt. Diese Wahl wird es ermöglichen bis zu einem gewissen Grad Teil- und Mindestlastzustände zu berücksichtigen.

⇒ Für ein zukünftiges Vorgehen wird auch der hinsichtlich Umweltbelastungen und Wirkungsgrad unterschiedliche Teillastbetrieb zu untersuchen sein.

Güter, die vom Unternehmen nur über einen längeren Zeitraum bilanziert sind, wurden auf den Betrachtungszeitraum umgerechnet; diskontinuierlich eingesetzte Güter wurden auf kontinuierliche Flüsse umgerechnet.

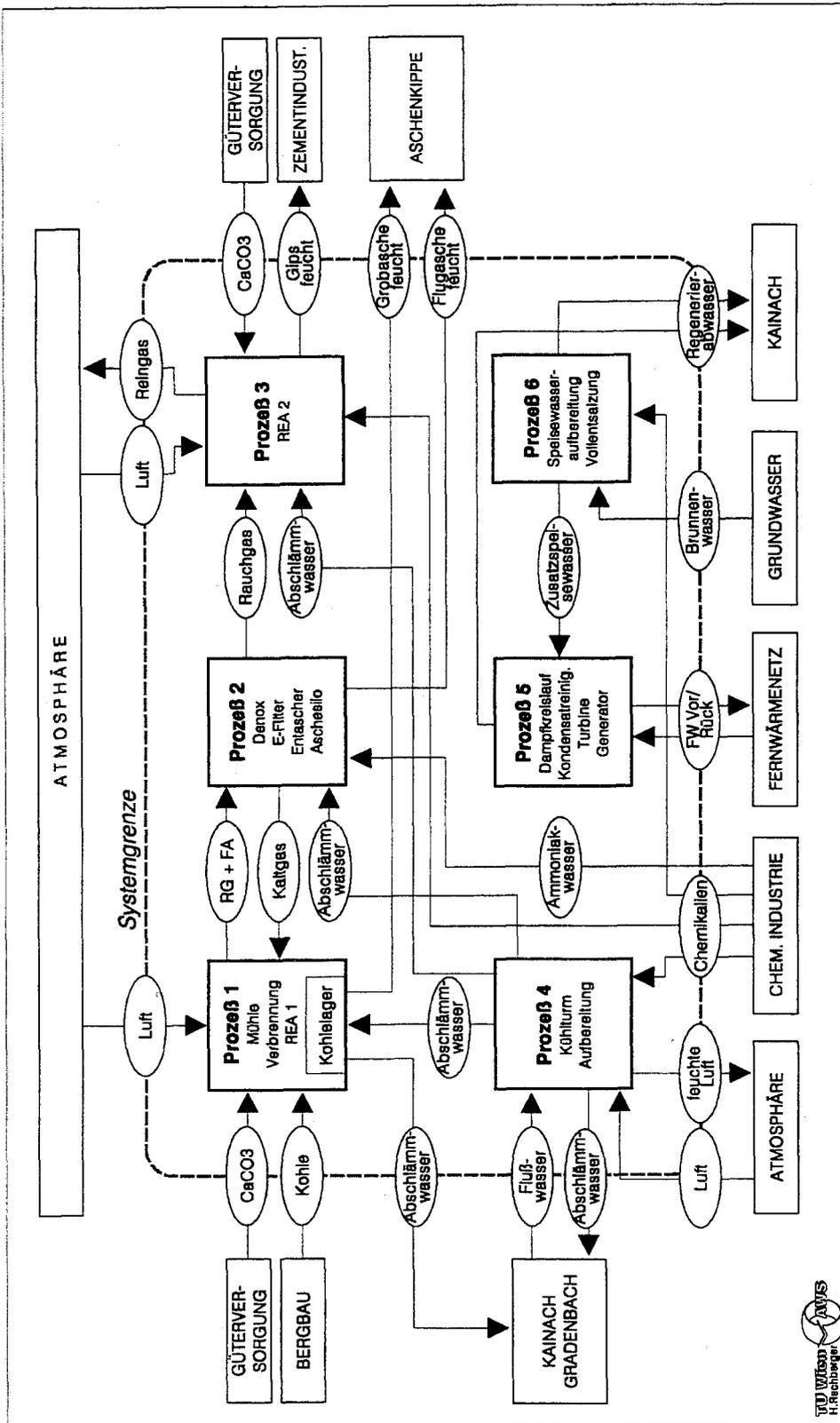
Folgende Prozesse werden zur Systemanalyse herangezogen:

1. Die Verbrennung, inklusive Kohlemühlen, erste Stufe der Rauchgasentschwefelung, Naßentschlacker und Kohlenlager
2. Elektrofilter inklusive Denoxanlage
3. Nasse Rauchgasentschwefelung
4. Kühlturm inklusive Aufbereitung des Haupt- und Nebenkühlkreislaufes
5. Dampfkreislauf inklusive Kondensatreinigung, Turbine und Generator
6. Speisewasseraufbereitung und Vollentsalzung

Folgende Güter wurden für diese Untersuchung ausgewählt:

1. Luft
2. Wasser
Wasser beinhaltet hier Fluß-, Brunnen-, Abschlamm-, Zusatzspeise-, Fernwärme- und Regenerierabwasser
3. Kohle
4. Chemikalien (Ammoniakwasser und andere in der Abgasreinigung und Wasseraufbereitung benötigte Chemikalien)
5. Reingas
6. Asche (Grob- und Flugasche)
7. Kalziumkarbonat
8. REA-Gips
9. Kaltgas und Rauchgas

Abb.7: Systemanalyse für die Güter- und Stoffbilanz des Kraftwerkes



4.2.2 Grobe Abschätzung von Massen-, Volumen- und Energiebilanz

Tabelle 1 zeigt die Güterflüsse des Kraftwerkes bei Vollast. Sämtliche Zahlen stammen von Mitarbeitern der ÖDK. Die rechte Spalte enthält die Massenflüsse für ein Betriebsjahr von 4.000 Vollaststunden. Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, daß während dieses Zeitraumes keine An- und Abfahrvorgänge stattfinden bzw. keine Teil- und Mindestlastzustände gefahren werden. Diese Vorgehensweise ist im Wesentlichen durch die derzeitige Datenlage bestimmt. Wie bereits erwähnt, wird in Kapitel 5 ein anderer Ansatz vorgestellt, der für ein weiteres Vorgehen angewandt werden sollte.

Tab.1: Güterflüsse des Kraftwerkes (Vollast)

	Güter	Massenflüsse	
		t/h	kt/BJ*
	Gase		
	- Luft -		
1	Verbrennungsluft	1.200	4.800
2	Luft für REA2	19	76
3	Luft Kühlturm	24.000	96.000
4	Abluft Kühlturm	24.400	97.600
5	Dampfverluste	1	4
6	Kaltgas		
7	Rauchgas	1.444	5.800
8	Reingas	1.518	6.000
9	technisches CO ₂ für Neutralisation im Naßentschlacker	5E-03	2E-02
	Flüssigkeiten		
	- Wasser -		
10	Flußwasser aus Kainach und Gradenbach	690	2.800
	<i>Abschlammwässer</i>		
11	Abschlammwasser zum Naßentschlacker	40	160
12	Überlauf aus dem Naßentschlacker	36	140
13	Abschlammwasser zum Anfeuchte der Flugasche	14	56
14	Abschlammwasser zur REA2	60	240
15	Abschlammwasser zurück an die Kainach	180	720
16	Zusatzspeisewasser (Deionat)	6,3	25
17	Brunnenwasser	6	24
18	Regenerierabwässer	0,64	3
19	Fernwärmewasserkreislauf		

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tab. 1:

Flüssigkeiten			
		kg/h	t/BJ
- Chemikalien -			
<i>Wasseraufbereitung</i>			
20	Ammoniakwasser für DENOX	360	1.440
21	HCl 33%	6,1	24
22	NaOH 50%	1,8	7,2
<i>Kondensataufbereitung</i>			
23	HCl 33%	0,4	1,6
24	NaOH 50%	0,17	0,68
<i>Alkalisierung des Wasser/Dampfkreislaufes</i>			
25	NH ₃	0,1	0,4
<i>Kühlwasserkreislauf</i>			
26	Nalco 8101	0,44	1,8
<i>Härtestabilisator, Dispergator, Korrosionsinhibitor</i>			
27	Henkel P3 - ferrofos 8441	2,4	9,6
<i>Flockungsmittel im Eindicker der REA2</i>			
28	Nalco 4710	0,12	0,48
Feststoffe		t/h	kt/BJ
29	Kohle	300	1.200
30	CaCO ₃ für TAV	0	0
31	CaCO ₃ für REA2	6	24
32	Flugasche 20% Feuchte	69	280
33	Grobasche 40% Feuchte	10	40
34	Gips 11,6% Feuchte	11	44

*BJ: Betriebsjahr von 4000 Vollaststunden

Abb.8: Massenbilanz für das Kraftwerk

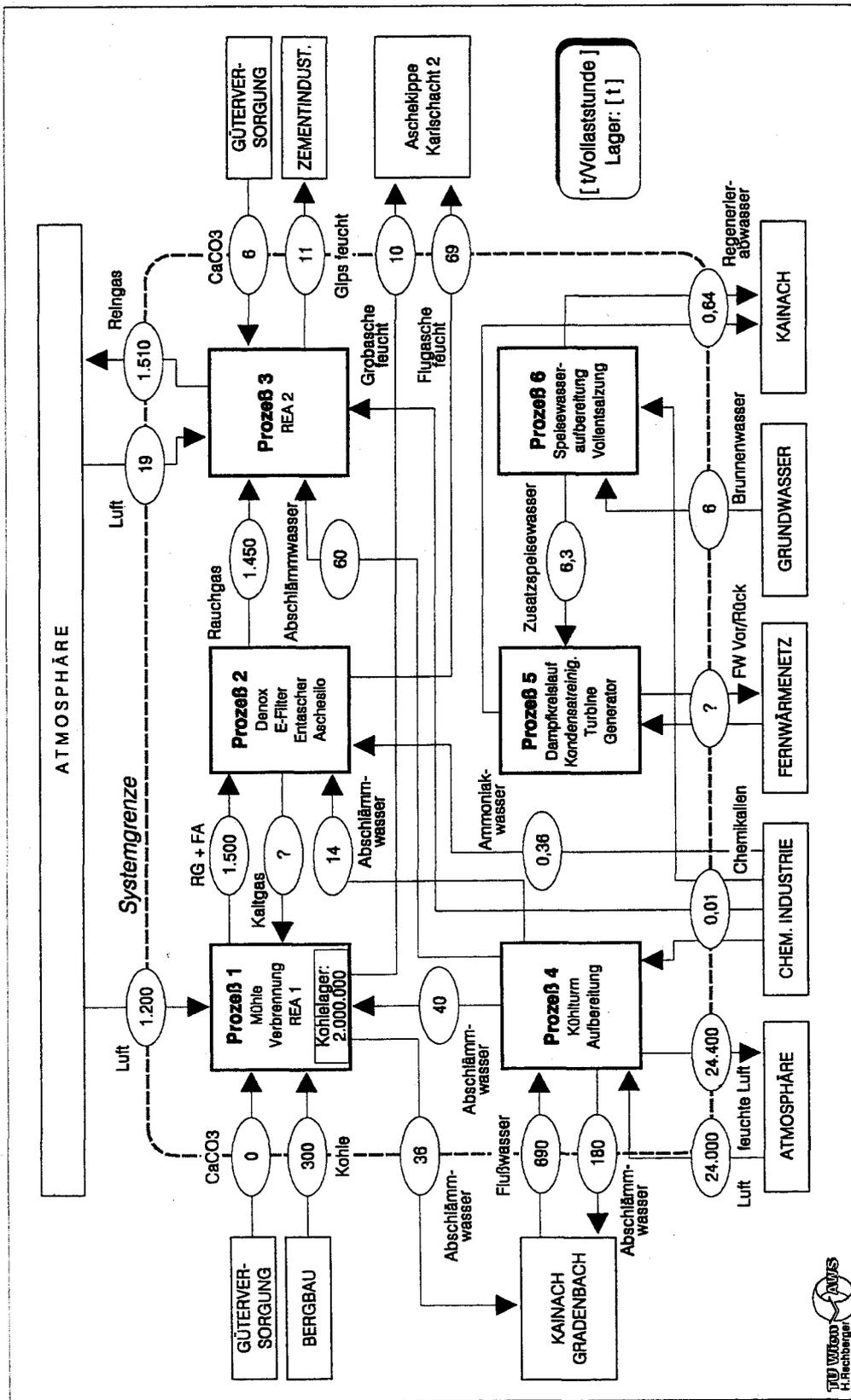
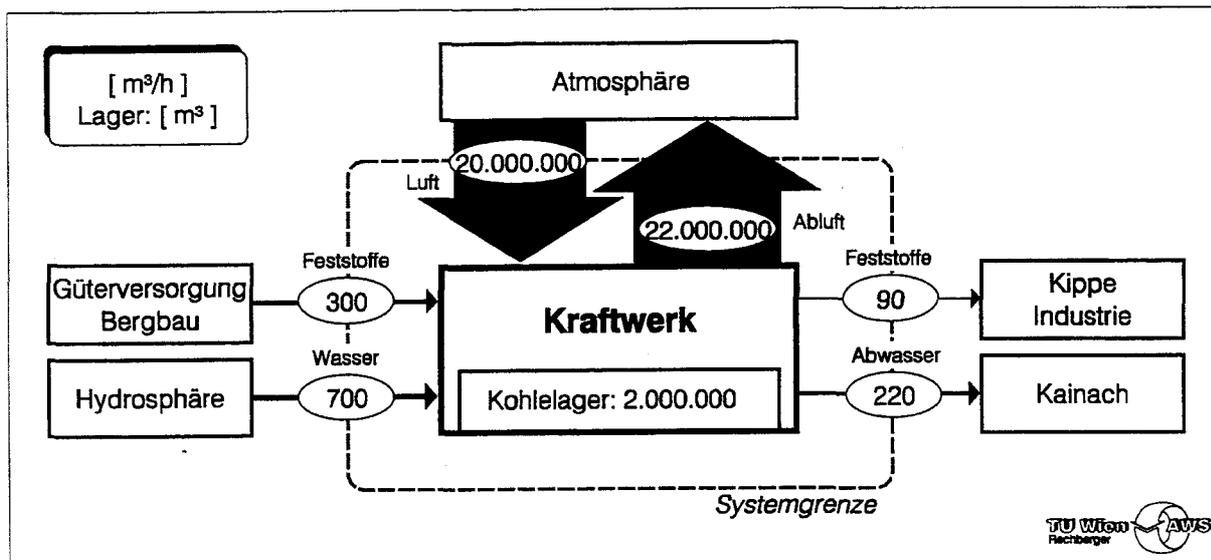


Abb.9: Volumenbilanz für das Kraftwerk



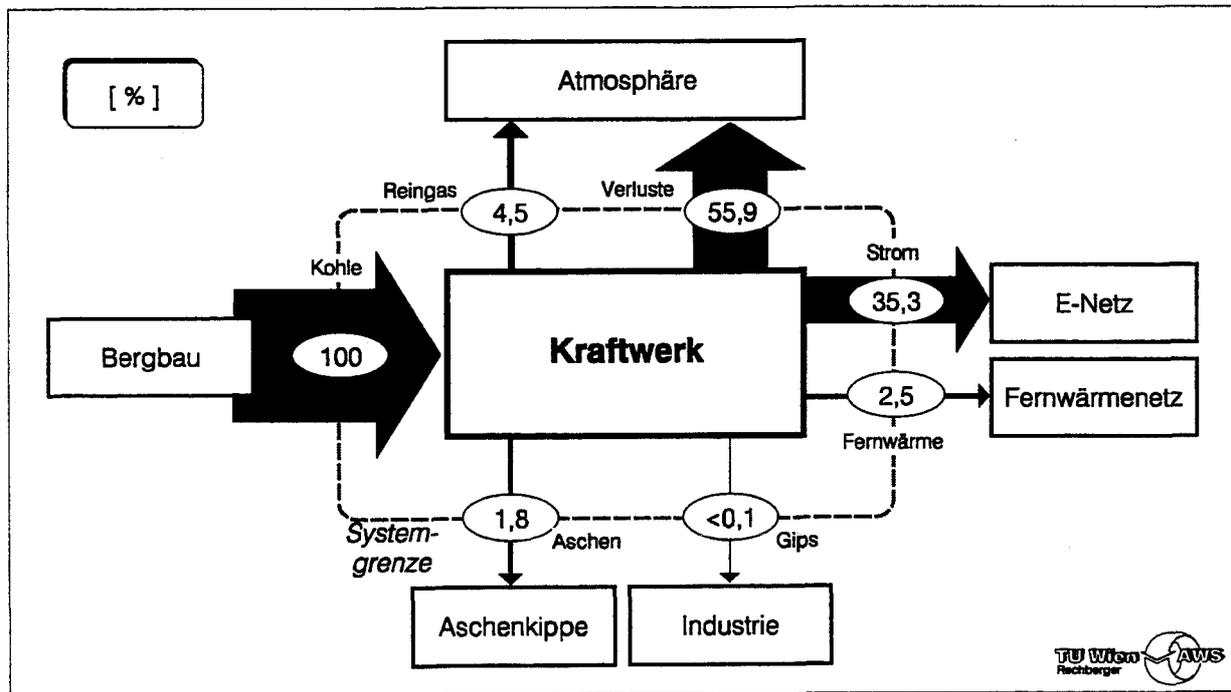
Wie aus Abbildung 9 ersichtlich ist, wird die Volumenbilanz von den gasförmigen Güterflüssen dominiert. Feststoffe und Wässer spielen im Gegensatz zur Massenbilanz (Abb.8) nur mehr eine untergeordnete Rolle. Bei 4.000 Betriebsstunden pro Jahr verursacht das Kohlekraftwerk ein "Loch" von rund 0,7 Mio m³. Das für die Ablagerung der Aschen des Kraftwerkes benötigte Deponievolumen beträgt dagegen nur 320.000 m³; es ist zu prüfen, inwiefern das "Loch" für die Ablagerung anderer, der Kohle chemisch ähnlicher, vorbehandelter Abfälle genutzt werden kann.

Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit war es nicht möglich, für dasselbe System "Kraftwerk" eine Energiebilanz analog zur Massenbilanz für Güter und Stoffe durchzuführen. Die Darstellung in diesem Kapitel muß sich daher auf die Betrachtung des Kraftwerkes als "black box" beschränken. Nur jene Energieflüsse, welche die Systemgrenze überschreiten und das Kraftwerk mit der Region verknüpfen, sind dargestellt. Um diese Energieflüsse steuern zu können, müßte man das Kraftwerk allerdings in seine wichtigsten Prozesse, analog zur Systemanalyse für Güter und Stoffe, zerlegen. Diese Systemanalyse wäre für weitere energetische Fragestellungen nützlich, z.B. um Fragen nach einer eventuellen Sinnhaftigkeit einer gesteigerten Fernwärmeauskoppelung in der Zukunft beantworten zu können.

Die räumlichen Systemgrenzen entsprechen denjenigen der Systemanalyse für die Güter- und Stoffbilanz (Abb.7). Für die Energiebilanz wurde als zeitlicher Rahmen eine fiktive Vollastbetriebsstunde herangezogen, d. h. die Betriebsdaten für den Jänner 1992 wurden auf äquivalente Vollaststunden bezogen. Für eine detailliertere Darstellung sollte auch noch eine Bilanz für Mindestlast miteinbezogen werden. Auch für diesen zeitlichen Ansatz gilt das oben zur Massenbilanz Gesagte: der Verweis auf Kapitel 5.

Zusätzlich zu den unter 4.2.1 ausgewählten Gütern für die Güter- und Stoffbilanz des Kraftwerkes muß für die Energiebilanz aus plausiblen Gründen die Energieform "Strom" miteinbezogen werden.

Abb.10: Energiebilanz des Kraftwerkes für eine Vollaststunde



In Abbildung 10 sind die Anteile der Energieflüsse für eine Vollaststunde in Prozenten dargestellt. Es sind dies die chemisch gebundene Energie in der Kohle auf der Seite der Inputströme, die fühlbaren Wärmen der Güterflüsse der Aschen (Grob- und Flugasche), des Gipses, des Reingases und der Fernwärme auf der Outputseite. Hinzu kommen noch die zum Teil an Materie gebundenen Energieflüsse Strom und die Verluste durch Strahlung, Konvektion und Leitung. Diese sind im Strom "Verluste" (Abb. 10) zusammengefaßt mit den materiegebundenen Verlusten über Kühlturm (Abluft) und Vorfluter (Abwasser).

Die für diese Abschätzung herangezogenen Prozeß- und Stoffdaten, sowie die Energieströme (Leistungen) des Kraftwerkes sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Sie beziehen sich, soweit verfügbar, auf den Jänner 1992.

Tab.2: Prozeß- und Stoffdaten für die Energiebilanz des Kraftwerkes

	t/h	Cp, Hu kJ/kgK, kJ/kg	T-To To=0°C	GJ/h	MW
Kohle	312	9.720		3.030	842
Luft	1.200	1	0	0	0
Reingas	1.530	1,1	80	135	38
Strom				1.069	297
Fernwärme				76	21
Grobasche	6	0,7	250	52	
Flugasche	55	0,7	180	1,1	
Aschen gesamt	61			53	15
Gips	11	1,7	40	0,8	0,2
Verluste				1.696	471

Erläuterungen zur Tabelle 2:

1. Im Betrieb werden nicht vollständig zermahlene und daher für die Staubfeuerung zu große Teilchen nur teilweise verbrannt. Diese Partikel fallen auf Grund ihrer Masse im Kessel als Teil der Grobasche an. Der nicht mineralische Anteil kann als koksähnlich (Kohlepartikel werden entgast und anschließend nicht mehr vollständig oxidiert) bezeichnet werden. Diese Grobasche besitzt demgemäß einen nicht zu vernachlässigenden Heizwert von etwa 7.500 kJ/kg. Dies soll durch folgende Abschätzung belegt werden: Es fallen ca. 6 t/h Grobasche an. Aus der Elementaranalyse (Tagessammelprobe vom 6.5.1991) ergibt sich ein Kohlenstoffanteil von 30 Gew-% C. Nimmt man an, daß ca. 85% dieses Kohlenstoffanteiles als Koks vorliegen, so sind das ca. 25 Gew-% bezogen auf die Grobasche oder 1.500 kg/h Koks ($H_U=30$ MJ/kg). Das gibt eine chemisch gebundene Energie von ca. $45 \cdot 10^6$ kJ/h.

Es bleibt zu überprüfen, ob die anfallende Grobasche nicht in den Feuerraum zurückgeführt werden kann und der Ascheaustrag somit nur über den E-Filter erfolgt. Der Vorteil dabei wäre eine Wirkungsgraderhöhung durch den besseren Ausbrand in der Größenordnung bis 1%, die Senkung des Kohlenstoffgehaltes in der Aschenkippe und der Verzicht auf das Naßentschlackensystem, das möglicherweise eine thermische und stoffliche Belastung für den Vorfluter darstellt.

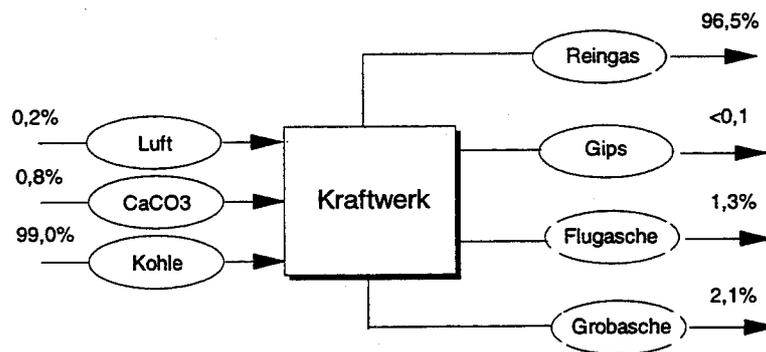
2. Die Verluste umfassen die über Kühlturm und Kainach abgegebene Wärme, sowie die Verluste durch Strahlung, Konvektion und Leitung. Eine grobe Abschätzung der Verluste über den Kühlturm wäre die folgende: Der Kühlturm besitzt einen Luftdurchsatz von ca. 24.000 t/h. Bei einer Aufwärmung der Luft von 0° auf 25°C und dem Ausgangszustand der vollständigen Sättigung ($H_{1+x,0^\circ}=5$ kJ/kg; $H_{1+x,25^\circ}=78$ kJ/kg) kommt man auf einen Verlust von 1.750 GJ/h. Das entspricht in etwa dem in Tabelle 2 ausgewiesenen Verlust.

4.2.3 Pauschale erste Bilanzierung ausgewählter Stoffe als Grundlage für die Erstellung einer Machbarkeitsstudie

In Abb. 11 und 12 sind Stoffflußanalysen für die Elemente Kohlenstoff und Schwefel dargestellt. Die Richtigkeit der beiden Analysen ist durch die zeitlich zum Teil sehr weit auseinanderliegenden Probenentnahmen für Kohle, Grob-, Flugaschen, Gips und Reingas mehr oder weniger beeinträchtigt. Auf die Problematik der unzulänglichen Datenlage wird speziell in Kapitel 5 eingegangen. Hier soll nur das prinzipielle Vorgehen dargestellt werden.

Zunächst wurden sämtliche im System Kraftwerk benötigten Güter quantitativ erfaßt (*Kapitel 4.2.1*). In einem weiteren Schritt wurden die Massenbilanzen für die einzelnen Prozesse erstellt (*Kapitel 4.2.2*), um schließlich über Konzentrationsangaben von Elementen in den Gütern den Fluß der Elemente durch das Kraftwerk darstellen zu können.

Abb.11: Verteilung des Kohlenstoffs auf die Produkte des Kraftwerkes, in %

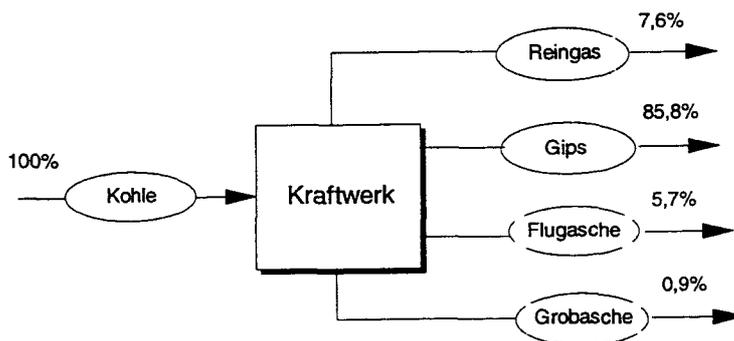


Tab.3: pauschale Kohlenstoffbilanz des Kraftwerkes

Stoff	Kohlenstoff		C
Güter	t/h	Gew-%	t/h C
Input			
Kohle	299	28,24	84,44
CaCO3 für REA2	6	12	0,72
Verbrennungsluft	1200	1,33E-02	0,16
Output			
Grobasche	6	30,2*	1,81
Flugasche	55	2	1,10
Gips	9,5	4,00E-01	0,04
Reingas	1518	5,43	82,37

*Der hohe Kohlenstoffanteil in der Grobasche resultiert aus der unvollständigen Verbrennung von Kohlepartikeln in der Staubfeuerung (s. Erläuterungen zur Tabelle 2 im Kapitel 4.2.2).

Abb.12: Verteilung des Schwefels auf die Produkte des Kraftwerkes, in %



Tab.4: pauschale Schwefelbilanz des Kraftwerkes

Stoff	Schwefel	S	
Güter	t/h	Gew-%	kg/h
Input			
Kohle	299	0,65	1943,5
Output			
Grobasche	6	0,3	18
Flugasche	55	0,2	110
Gips	9,5	17,55	1667
Reingas	1518	9,80E-03	148,5

Der in der Tabelle 4 bilanzierte SO_2 -Anteil im Reingas überschreitet den gemessenen Wert um rund 26%. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich in der zeitlichen Inkohärenz der Asche- und Reingasbeprobung, bzw. in einer zu gering angenommenen Gipsmenge (Langzeitmittelwert).

4.3 Aschenkippe

Der östliche Bereich des ehemaligen Braunkohletagbaues Karlschacht 2 mit einem Fassungsvermögen von rund 6 Mio m^3 wird seit 1982 zur Lagerung der anfallenden Kraftwerksaschen genutzt. Die Aschelagerung wurde zunächst mit Hilfe des einfachen Einschlammverfahrens durchgeführt, das heißt, die Asche wurde mit einem 10fachen Wasserüberschuß versetzt, sie wird dadurch fließfähig und breitet sich im gesamten Kippenbereich mit einem relativ konstanten Neigungswinkel von rund 3 Grad aus. Durch den Wasserüberschuß hat sich im Laufe der Zeit ein intensiv in grünen Farben leuchtender Schlammteich gebildet, dessen pH-Wert 12,9 betrug. Daraufhin wurde die Aschelagerungsmethode geändert. Ab 1985 wird im Karlschacht die Asche trocken gestapelt; sie wird auf verschieblichen Bandstraßen transportiert, von Absetzern zwischengelagert und mit Schubraupen zum endgültigen Einbauort geschoben und ver-

dichtet. Das aus dem Einschlammverfahren stammende Überschußwasser wurde durch Eindüsen von CO₂-Gas neutralisiert und anschließend in den Vorfluter entsorgt.

Der Karlschacht 2 stellt eine praktisch wasserdichte Wanne dar, die aus Tertiärquarzit besteht; in diesem Gestein lagerte vor Beginn der Abbautätigkeiten die Braunkohle. An der Nordseite des Karlschachtes steht dolomitisches Gestein an. Der Dolomit ist von einzelnen Klüften durchzogen, zeigt aber im allgemeinen eine gute Dichtigkeit. Um die Beeinflussung des Grundwassers bei einer Durchströmung des Lagers über undichte Böschungsbereiche zu verhindern, werden zur Zeit die Bereiche des anstehenden Dolomits und der obere Grundwasserhorizont, der aus quartären Schottern aufgebaut ist, abgedichtet. Es wird dabei ein Stabilisat aus Braunkohleasche und Karbidkalk - ein Rückstand der Azetylgasherstellung - als Dichtungsmaterial eingesetzt. Zur Erzeugung des Aschestabilisats wurde im Karlschacht 2 eine Mischanlage errichtet. Die Asche wird nach Zerkleinerung über ein Förderband der Mischanlage zugeführt. Der Karbidkalk wird vor dem eigentlichen Mischvorgang in Wasser aufgerührt und als Suspension in den Mischer gepumpt. Durch intensive Mischung von 5 bis 15% Masse Kalkhydrat mit 85 bis 95% Masse Braunkohleasche kommt es durch Zugabe von Wasser in einem Verhältnis Wasser/Feststoff von 0,25 bis 0,38 zu entsprechenden Verfestigungsreaktionen. Je nach Dosierung der Komponenten können alle Vorgaben bezüglich Durchlässigkeit erfüllt werden. Die entsprechenden Laborwerte liegen quantitativ zwischen $5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ und $5 \times 10^{-11} \text{ m/s}$. Druckfestigkeiten können von 3 N/mm^2 bis 30 N/mm^2 eingestellt werden. Die Elastizitätsmoduli solcher Produkte liegen zwischen 8 und 12 MN/mm^2 . Das pumpfähige Gemisch wird in ein Zweiwandgewebe, bestehend aus Polypropylengewebebahnen, die mit durchgewebten Quersfadensbündeln auf Abstand fixiert sind und auf den abzudichtenden Böschungen aufgebracht wurden, verfüllt.

Entsprechend der aufgestellten Güterbilanz des Kraftwerkes (Tab.1) werden im Jahr rund 320.000 t Asche (feucht) auf der Kippe entsorgt. Es lagern dort bis zum heutigen Zeitpunkt also rund 4,1 Mio t Asche, was, bei einer Dichte von 1 t/m^3 (Mitteilung von Dr. Schöngrundner), einem Volumen von ca. 4,1 Mio m³ entspricht. Die Oberfläche der Kippe beträgt rund 350.000 m².

Laut mündlicher Mitteilung eines Mitarbeiters der ÖDK fällt auf der Aschenkippe kein Sickerwasser an; das Regenwasser sammelt sich am tiefsten Punkt der Oberfläche und wird in der trockenen Jahreszeit zum Befeuchten der Asche auf der Kippe versprüht.

5. Vorschlag für ein methodisches Vorgehen zur Erstellung einer Massen-, Volumen-, Energie- und Stoffbilanz des Kraftwerkes einschließlich seiner Peripherie

Zur Erstellung einer Massen-, Volumen-, Energie und Stoffbilanz des Kraftwerkes wird die Methodik der Stoffflußanalyse angewandt. Das methodische Vorgehen zur Erstellung einer solchen Analyse besteht aus acht Teilschritten [Daxbeck H.& Brunner P. 1993]. Diese sollen exemplarisch für die Erstellung einer Stoffbilanz des Systems "Kraftwerk & Peripherie" diskutiert werden. Für die Erstellung von Volumen- und Energiebilanzen muß dieses methodische Vorgehen offensichtlich modifiziert werden. In der Folge werden neun Teilschritte dargestellt.

I. Formulierung der Ziele und der Fragen.

Die Zielsetzung ist in Kapitel 2, die Fragestellung in Kapitel 3 nachzulesen. In diesem Kapitel werden nur die Fragen, die sich auf das Kraftwerk mit seiner Peripherie beziehen, behandelt. Fragen nach der Einbettung in die Region werden im Kapitel 6 diskutiert.

II. Systemanalyse (Auswahl der Systemgrenzen, der Prozesse, Güter und Stoffe).

Die Systemanalysen für Kraftwerk und Bergbau wurden jeweils getrennt in den Kapiteln 4.1.1 und 4.2.1 behandelt. Zur Erstellung der Systemanalysen für Kraftwerk bzw. Bergbau wurden die einzelnen Prozesse über die Güterflüsse miteinander verknüpft, wobei jedes Gut über einen Herkunfts- und Zielprozeß verfügt, bzw. jeder Prozeß mindestens je einen Input als auch einen Output besitzt. Für diesen Schritt wurden die komplexen Systeme Bergbau und Kraftwerk auf ein handhabbares Maß reduziert. Die Systemgrenzen wurden in Kapitel 4.1.1 bzw. 4.2.1 definiert und die zu untersuchenden Prozesse und Güter ausgewählt.

Die Aufgabe in diesem Arbeitsschritt besteht darin, die Systeme "Kraftwerk," "Bergbau" und "Aschenkippe" zu einem Gesamtsystem "Kraftwerk mit Peripherie" (KW&P) zusammenzufügen, dessen konstituierende Subsysteme sie dann darstellen. Diese Aufgabe ist insofern nichttrivial, als für solch ein Zusammenfügen die zeitlichen Systemgrenzen in einer konsistenten Weise aufeinander abgestimmt werden müssen. Das bedeutet insbesondere für das System Kraftwerk eine notwendige Modifikation seiner zeitlichen Grenzen. Dazu wurde wie folgt vorgegangen:

Um dem in der Systemanalyse "Kohlebergbau" definierten mittleren Förderjahr zu entsprechen, und um einer möglichst langfristigen Betrachtungsweise Rechnung zu tragen, wurden für das Kraftwerk die zur Verfügung stehenden Betriebsdaten über einen längeren Zeitraum (1987-1993) gemittelt. Aufgrund dieser Mittelung wurde ein "Normalbetriebsjahr" von 4.000 Betriebsstunden definiert. Dieses mittelt gemäß seiner Konstruktion über den "typischen" Kraftwerksbetrieb mit all seinen Voll-, Teil- und

Mindestlastbetriebszuständen und seinen An- und Abfahrvorgängen. Die zeitlichen Systemgrenzen für das System "Aschenkippe" wurden auf analoge Weise dem mittleren Förderjahr des Bergbaues und dem "Normalbetriebsjahr" des Kraftwerkes angepaßt.

Vor der Diskussion der in Tab.5 dargestellten Prozesse und Güter, soll noch kurz auf die Auswahl der Stoffe eingegangen werden. Folgende Elemente wurden für die Untersuchungen ausgewählt: Die Nichtmetalle Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel und Chlor, sowie die Metalle Kalzium, Aluminium, Eisen, Cadmium, Blei, als auch die Übergangselemente Arsen und Selen.

Der Grund für diese Auswahl liegt einerseits in der Wichtigkeit der angeführten Elemente für die chemischen Reaktionen der Energieumwandlung während des Verbrennungsprozesses; andererseits werden viele der ausgewählten Elemente in Emissionsvorschriften begrenzt, was bedeutet, daß verfügbare Daten vorliegen. Arsen und Selen wurden gewählt, weil sie für Kohle typische Spurenstoffe sind. Kalzium ist wegen seines Einsatzes in der Rauchgasreinigung ein mengenmäßig wichtiges Element.

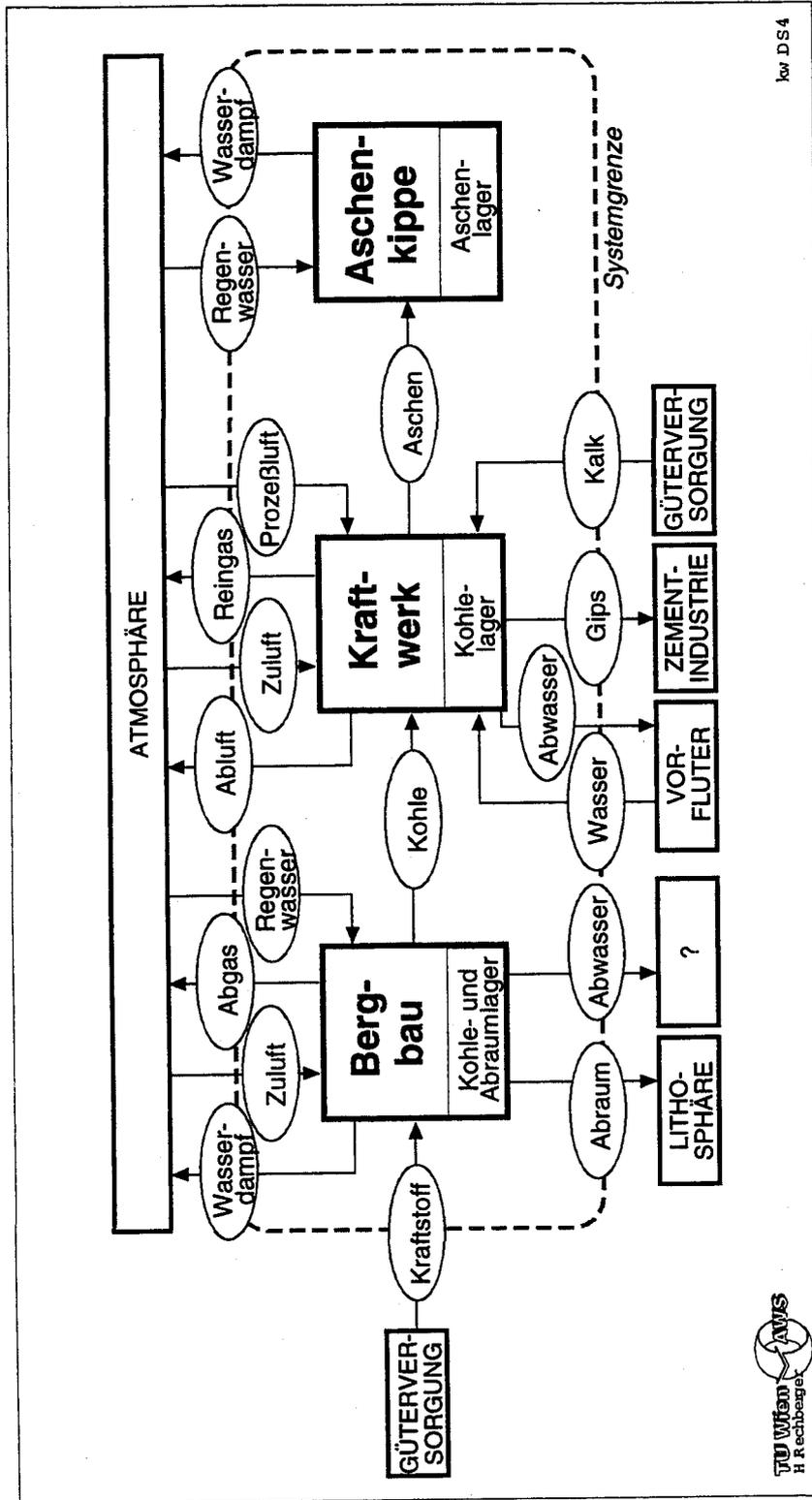
In Tabelle 5 finden sich die Güter und Prozesse des Systems "Kraftwerk & Peripherie" aufgelistet. Es fällt auf, daß die in Tab.5 angeführten Güter nicht alle in 4.1.1, 4.2.1 und 4.2.6 aufgelisteten Güter für Bergbau, Kraftwerk und Aschenkippe umfaßt. So sind beispielsweise die in Tab.1 aufgelisteten Chemikalien zur Wasseraufbereitung und das zur Entstickung verwendete Ammoniakwasser nicht in Tab. 5 enthalten. Dies begründet sich mit der Tatsache, daß, hinsichtlich der oben ausgewählten Stoffe, die über diese Güter transportierten Stofffrachten gegenüber den anderen Stoffströmen zu vernachlässigen sind.

Tab.5: ausgewählte Prozesse und Güter

Ausgewählte Prozesse		Ausgewählte Güter	
Bergbau	Input:	Output:	Lager:
	Kraftstoff Regenwasser Luft	Abraum Kohle Abgas Abwasser Wasserdampf	Kohle-und Ab-raumlager
Kraftwerk	Input:	Output:	Lager:
	Kohle Kalk Wasser Zuluft (Kühlturm) Prozeßluft	Aschen Gips Abwasser Abluft (Kühlturm) Reingas	Kohlenlager
Aschenkippe	Input:	Output:	Lager:
	Aschen Regenwasser	Wasserdampf	Aschelager

⇒ Für ein weiteres Vorgehen bleibt noch der Zielprozeß des Outputgutes Abwasser aus dem Bergbau abzuklären. Bei der Aschenkippe fällt kein "Output" an, da laut mündlicher Mitteilung ein Teil des Regenwassers zum Befeuchten der Asche verwendet wird und der Rest verdunstet.

Abb.13: Systemanalyse des gesamten Kraftwerkes einschließlich seiner Peripherie



III. Erste Schätzung der Massen-, Volumen-, Energie- und Stoffbilanz anhand rasch verfügbarer Daten

Sowohl eine grobe Abschätzung der Massen-, Volumen- und Energiebilanz, als auch eine provisorische erste Stoffbilanz ausgewählter Elemente, wurde für das "Kraftwerk & Peripherie" in den Kapiteln 4.1.2 bis 4.3 durchgeführt. Eine provisorische Bilanz ermöglicht es, die für das System sensiblen Prozesse und Güter zu erkennen. Die Bedeutung eines Prozesses für das Gesamtsystem hängt stark von den zu untersuchenden Stoffen ab. So ist beispielsweise der Güterfluß "Abraum" im System Bergbau der massenmäßig bedeutsamste, hinsichtlich des Kohlenstoffflusses hingegen, dürfte er nahezu vernachlässigbar sein.

Abb.14 zeigt eine vorläufige Massenbilanz, und Abb.15 eine vorläufige Volumenbilanz für das System "Kraftwerk & Peripherie". Aufgrund der verfügbaren Daten konnte zunächst nicht genauso wie in Punkt II beschrieben vorgegangen werden. Es waren nicht für alle in Tab.5 aufgelisteten Güter Zeitreihen der gewünschten Länge verfügbar. Deshalb wurde der Güterfluß durch das Kraftwerk bezogen auf ein Betriebsjahr mit 4.000 Vollaststunden (s. Tab.1) mit dem Korrekturfaktor (Kohleförderung eines mittleren Abbaujahres [kt/a] / Kohlebedarf für ein 4.000 Vollaststundenjahr [kt/a]) skaliert, um bezüglich des Kohleoutputs aus dem Bergbau und des Kohleinputs in das Kraftwerk Übereinstimmung zu erzielen. Analog wurde für die vorläufige Volumenbilanz vorgegangen. Die mit Fragezeichen gekennzeichneten Flüsse konnten mangels verfügbarer Daten nicht bestimmt werden.

IV. Erstellung eines Untersuchungs- und Meßprogrammes für die Bestimmung der Güter- und Stoffflüsse unter Einbeziehung der notwendigen Genauigkeit der Resultate

Auf die Durchführung eines in Frage kommenden Meßprogrammes wird in Kapitel 7 eingegangen.

Abb.14: Vorläufige Massenbilanz für Kraftwerk & Peripherie

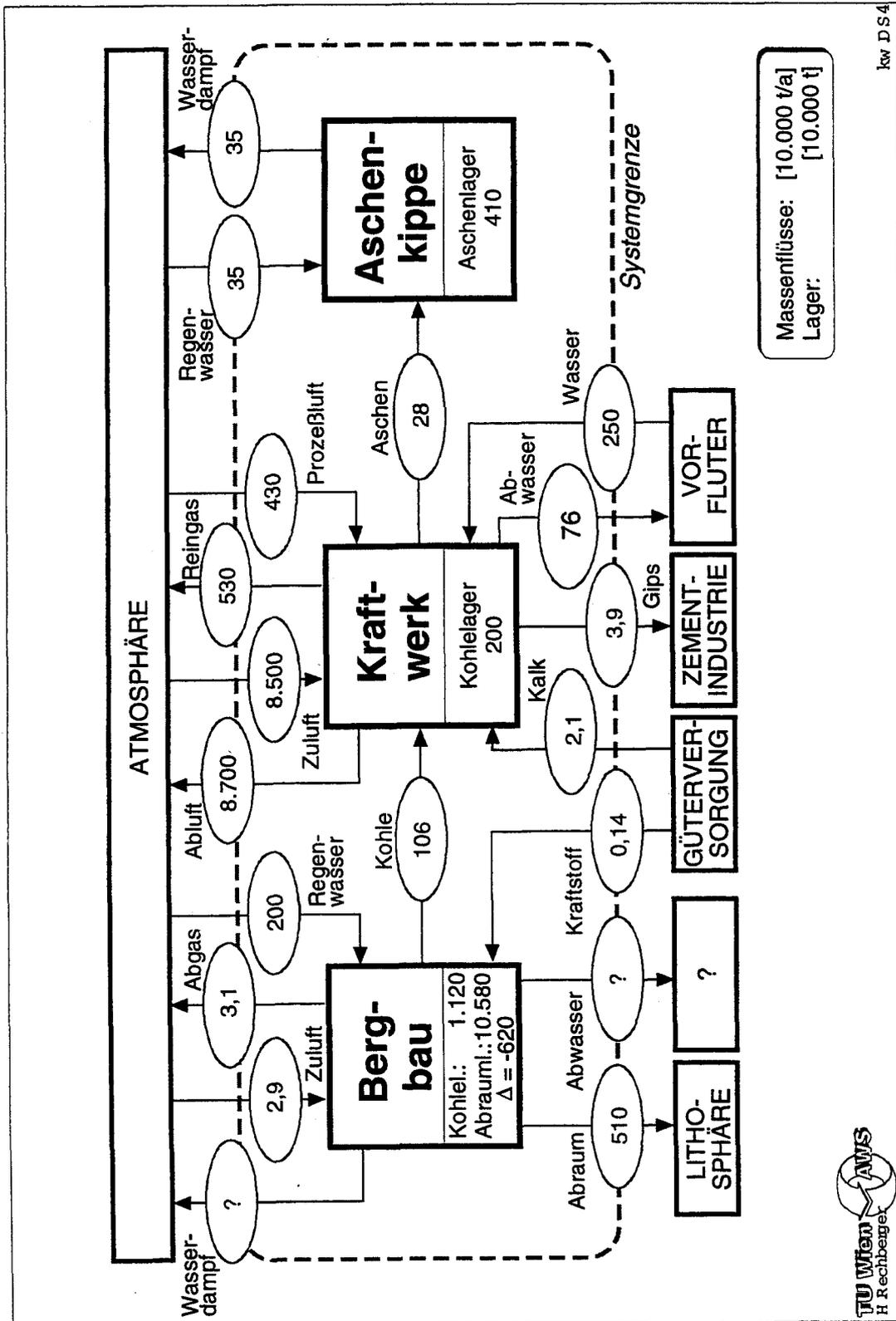
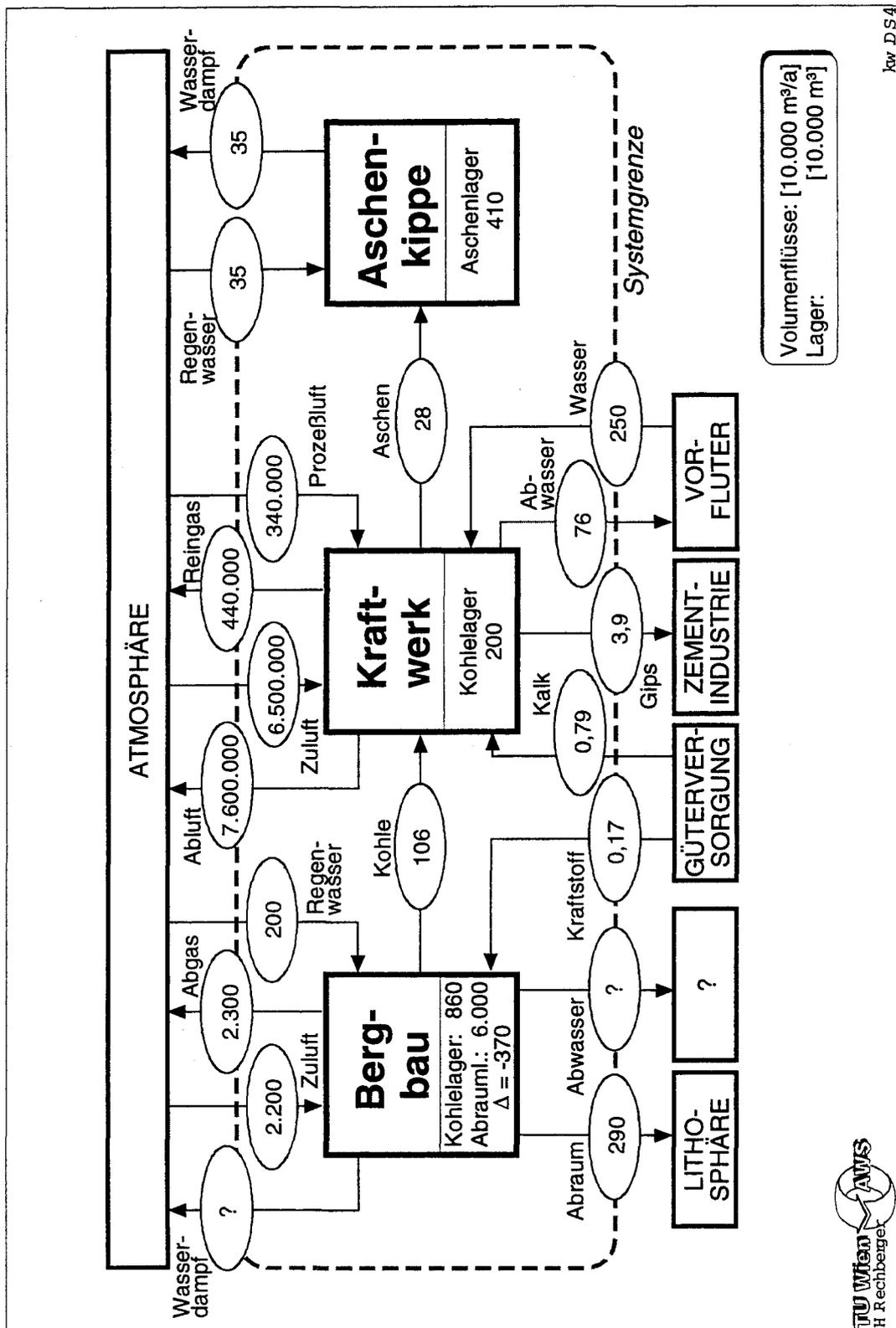


Abb.15: Vorläufige Volumenbilanz für Kraftwerk & Peripherie



V. Bestimmung der Massenflüsse der Güter

Die erste definitiv zu erstellende Bilanz ist die Güterbilanz, wobei in dieser Phase nur mehr die in Punkt II ausgewählten Güter berücksichtigt werden. Sie ist Voraussetzung für alle weiteren Schritte. Ob und wie gut die Güterbilanz aufgeht, hängt von der Qualität der zur Verfügung stehenden Daten ab. In Punkt V wird beschrieben, wie für ein weiteres Vorgehen die Massenflüsse der Güter ermittelt werden sollen.

Aufgrund der vorliegenden Daten war es für das Kraftwerk möglich, eine Vollaststunde (ohne REA1 Einsatz) zu bilanzieren und auf ein Betriebsjahr von 4.000 Vollaststunden hochzurechnen. Wie bereits eingangs in Punkt II erwähnt, berücksichtigt diese Rechnung jedoch nicht die übrigen Betriebszustände bzw. die An- und Abfahrvorgänge. Diese können durch Mittelung der Betriebsdaten über einen längeren Zeitraum berücksichtigt werden.

Tabelle 6 enthält Zeitreihen einiger Betriebsdaten, wie etwa elektrische Erzeugung brutto bzw. netto, Betriebsstunden, Fernwärmeauskopplung, Kohleinput und die jährlichen CO₂, NO_x, SO₂ und Staubfrachten für die Jahre 1987 - 1993. Aus diesen Daten konnten zwei Klassen spezifischer Größen unmittelbar abgeleitet werden: solche die auf eine normale Betriebsstunde bezogen sind (berücksichtigen An- und Abfahren, Teil- und Mindestlast), und solche die auf äquivalente Vollaststunden bezogen sind. Dieses Vorgehen lieferte Größen der Art "elektrische Erzeugung pro Betriebsstunde" oder "CO₂ pro äquivalenter Vollaststunde". Diese Größen wurden über den dokumentierten Zeitraum von 1987-1993 gemittelt und sind ebenfalls in der Tabelle enthalten.

Aufgrund der oben beschriebenen Mittelung konnte einerseits ein "Normbetriebsjahr" aus 4.000 Betriebsstunden (berücksichtigt alle Betriebszustände), bzw. ein "fiktives Normbetriebsjahr" aus 4.000 äquivalenten Vollaststunden definiert werden. Das Normbetriebsjahr wurde im Hinblick auf das mittlere Förderjahr im Bergbau und der geplanten Auslegung des Kraftwerkes definiert (siehe Punkt II), während das fiktive Normbetriebsjahr als Kontrollgröße für das in Kapitel 4.2.1 vereinbarte Betriebsjahr von 4.000 Vollaststunden eingeführt wurde. Tabelle 7 weist die aus der Tabelle 6 hochgerechneten Erzeugungs- und Emissionsdaten aus.

Tab.6: Zeitreihen für einige Betriebsdaten

	Jahr	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	Mittel 87-93
el. Erzeugung netto	GWh/a	579	628	549	1.162	1.434	548	233	
el. Erzeugung brutto*	GWh/a	643	698	610	1.291	1.593	609	259	
Ferwärmeauskopplung	GWh/a	18	20	23	47	63	29	14	
Betriebsstunden	h/a	2.259	2.524	1.949	4.006	5.019	2.129	944	
äquivalente Vollaststunden	h/a	1.949	2.114	1.848	3.912	4.828	1.845	785	
Ferwärmeauskopplung in Vollstäquivalenten	h/a	480	533	613	1.253	1.680	773	373	
CO2/äquivalenter Vollaststunde	t/h	316	320	311	301	276	285	288	
Ferwärme-CO2/äquivalenter Vollaststunde	t/h	6,5	6,6	6,4	6,2	5,7	5,9	5,9	
Ferwärme-CO2	t/a	3.124	3.512	3.930	7.761	9.569	4.533	2.216	
SO2/äquivalenter Vollaststunde	t/h	0,21	0,21	0,17	0,19	0,21	0,26	0,22	
Ferwärme-SO2/äquivalenter Vollaststunde	kg/h	4,4	4,3	3,5	3,9	4,4	5,4	4,5	
Ferwärme-SO2	t/a	2,1	2,3	2,1	4,9	7,4	4,2	1,7	
Braunkohle	kt/a	638	617	511	1.069	1.383	570	239	
Faktor el. Erzeugung netto/Betriebsstunde	GW	0,26	0,25	0,28	0,29	0,29	0,26	0,25	0,27
Faktor Ferwärmeauskopplung/Betriebsstunde	GW	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Faktor Braunkohle/Betriebsstunde	t/h	282	244	262	267	276	268	253	265
Faktor Ferwärme-CO2/Betriebsstunde	t/h	1,4	1,4	2,0	1,9	1,9	2,1	2,3	1,9
Faktor Ferwärme-SO2/Betriebsstunden	kg/h	0,94	0,92	1,09	1,21	1,47	1,97	1,77	1,3
Faktor el. Erzeugung netto/äquiv. VLh	GW	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,3
Faktor Ferwärmeauskopplung/äquiv. VLh	GW	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
Faktor Braunkohle/äquiv. VLh	t/h	327	292	277	273	287	309	305	296
Faktor Ferwärme-CO2/äquiv. VLh	t/h	1,6	1,7	2,1	2,0	2,0	2,5	2,8	2,1
Faktor Ferwärme-SO2/äquiv. VLh	kg/h	1,1	1,1	1,1	1,2	1,5	2,3	2,1	1,5
SO2	t/a	417	446	310	736	1.026	485	170	
CO2	kt/a	616	676	575	1.176	1.335	525	226	
NOx	t/a	1.086	1.006	633	1.143	822	355	125	
Staub	t/a	63	68	59	120	167	67	25	
Faktor SO2/Betriebsstunden	kg/h	185	177	159	184	204	228	180	188
Faktor CO2/Betriebsstunden	t/h	273	268	295	294	266	247	239	269
Faktor NOx/Betriebsstunden**	kg/h	481	399	325	285	164	167	132	154
Faktor Staub/Betriebsstunden	kg/h	28	27	30	30	33	31	26	29
Faktor CO/Betriebsstunde***	kg/h								74
Faktor NH3/Betriebsstunde***	kg/h								1,3
Faktor SO2/äquiv. VLh	kg/h	214	211	168	188	213	263	217	210
Faktor CO2/äquiv. VLh	t/h	316	320	311	301	276	285	288	299
Faktor NOx/äquiv. VLh**	kg/h	557	476	342	292	170	192	159	174
Faktor Staub/äquiv. VLh	kg/h	32	32	32	31	35	36	32	33

* Annahme: Eigenbedarf ist 10% der Bruttoleistung

** Für den Mittelwert wurden nur die Betriebsjahre der DENOX-Anlage (1991-1993) herangezogen

*** Umweltdaten, Stand 01.01.1994, Mittelwert für 1989-1993

⇒ Für ein weiteres Vorgehen müssen für die in Tabelle 5 aufgelisteten Güter **Zeitreihen für mehrere Jahre** vorliegen. Analog zu dem eben beschriebenen Verfahren werden dann für alle Güterflüsse spezifische Flußgrößen gebildet, die über den betrachteten Zeitraum gemittelt werden. Diese Mittelwerte können dann auf das Normbetriebsjahr hochgerechnet werden. Ferner würde für eine solche Güterbilanz das in der REA 1 eingesetzte Kalkmehl mitberücksichtigt. Die Abschätzung der dem Kraftwerk zugeführten Prozeßluft müßte noch überprüft werden. Das Kohle- und Abraumlager des Bergbaues und das Aschenlager der Kippe können auch bei einem solchen Vorgehen nur größenordnungsmäßig abgeschätzt werden.

Tab.7: Erzeugungs- und Emissionsdaten

el. Erzeugung für Normbetriebsjahr	GWh/a	1.100
Fernwärmeauskopplung für Normbetriebsjahr	GWh/a	46
Braunkohleeinsatz für Normbetriebsjahr	t/a	1.060.000
SO ₂ -Ausstoß für Normbetriebsjahr	t/a	750
CO ₂ -Ausstoß für Normbetriebsjahr	kt/a	1.100
NO _x -Ausstoß für Normbetriebsjahr*	t/a	620
Staubemission für Normbetriebsjahr	t/a	120
CO-Emissionen für Normalbetriebsjahr	t/a	300
NH ₃ -Emissionen für Normalbetriebsjahr	t/a	10
Fernwärme-CO ₂ für Normalbetriebsjahr	t/a	7.500
Fernwärme-SO ₂ für Normalbetriebsjahr	t/a	5
Normalbetriebsjahr = 4.000 Betriebsstunden		
el. Erzeugung für fiktives Normbetriebsjahr	GWh/a	1.200
Fernwärmeauskopplung für fikt. Normbetriebsjahr	GWh/a	51
Braunkohleeinsatz für fikt. Normbetriebsjahr	t/a	1.180.000
SO ₂ -Ausstoß für fikt. Normbetriebsjahr	t/a	840
CO ₂ -Ausstoß für fikt. Normbetriebsjahr	kt/a	1.200
NO _x -Ausstoß für fikt. Normbetriebsjahr*	t/a	700
Staubemission für fikt. Normbetriebsjahr	t/a	130
Fernwärme-CO ₂ für fikt. Normalbetriebsjahr	t/a	8.400
Fernwärme-SO ₂ für fikt. Normalbetriebsjahr	t/a	6
fiktives Normbetriebsjahr = 4.000 äquivalente Vollaststunden		

* Seit 1991

Der hier beschriebene methodische Zugang zur Erstellung einer Güter- bzw. Massenbilanz über **spezifische Flußgrößen und deren Langzeitmittelwerte**, die dann auf die Flüsse für ein Normaljahr hochgerechnet werden, scheint im Lichte der bisherigen Untersuchungen **am besten geeignet**, den zeitlich nicht kontinuierlichen Prozessen bei Bergbau, Kraftwerk und Kippe Rechnung zu tragen.

VI. Bestimmung der Stoffkonzentrationen in den Gütern

Für die Bestimmung der Stoffkonzentrationen in den jeweiligen Gütern stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Sie können entweder durch Literaturstudien, oder durch Messung ermittelt werden. Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurden die Stoffkonzentrationen ausschließlich aus Literaturangaben bezogen. Die Güte dieser Daten soll nun näher diskutiert werden.

In Tabelle 8 sind die für diese Studie herangezogenen Analysenwerte der Schwermetalle der Güter Kohle, Aschen, Kalk, Gips, Staub und Reingas dargestellt. Wie man erkennen kann, weichen die Meßwerte, insbesondere bei den Gütern Grob- und Flugasche, beträchtlich voneinander ab. Es kann lediglich darauf hingewiesen werden, daß zum Zeitpunkt der Analysen von Maier et al. [Maier et al. 1989] bzw. Maier [Maier

1989] das Kraftwerk mit einer stark vom Standard abweichenden Kohle gefahren wurde. Während in den Umweltdaten (Umweltdaten Stand 1.1.1994) der mittlere Brennstoffeinsatz für die Jahre 1989 - 1993 mit 317 t/h angegeben wird, betrug der Kohle-Input bei Maier nur ca. 265 t/h. Betrachtet man die geringen Mengen der anfallenden Aschen (Maier: Flugasche ca. 30 t/h, Grobasche ca. 1,5 t/h; dazu im Vergleich Umweltdaten, Mittelwert 1989 - 1993: Flugasche 54 t/h, Grobasche 5,3 t/h) so wird klar, daß eine Kohle mit hohem Energieinhalt (Heizwert) zur Verfügung stand, die aber offensichtlich nicht dem langjährigen Durchschnitt entspricht. Wichtig ist hierbei die Feststellung, daß die Spurenelemente sowohl in der organischen Grundsubstanz, als auch in den Mineralien der Kohle vorkommen [Gluskoter 1975], [Kautz et al. 1984]. Jedoch ist der größere Anteil der Spurenelemente in den anorganischen Verbindungen enthalten [Kautz 1984], [Kautz et al.], [Smith 1980]. In ihnen treten in der Regel auch die höchsten Spurenelementgehalte auf [Kuhn et al. 1980]. Daraus folgt, daß der Aschegehalt der beprobten Kohle eng mit der Schwermetallkonzentration gekoppelt ist und somit die Werte von Maier nicht als repräsentativ für längere Zeiträume einzustufen sind. Für ein weiteres Vorgehen müssen daher statistisch abgesicherte, nach einem fixen Probeplan erstellte, Kohleanalysen durchgeführt werden. Darauf wird im Kapitel 7 genauer eingegangen.

VII. Berechnung der Stoffflüsse aus den Massenflüssen und den Stoffkonzentrationen einschließlich der Abschätzung der Unsicherheiten der Resultate

Die Stoffflüsse werden durch Multiplikation der Massenflüsse mit den jeweiligen Stoffkonzentrationen ermittelt.

Tab.8: Gegenüberstellung der Literaturdaten

Güter	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	V	Zn	Zn/Cd
	[mg/kg]										
Kohle											
Maier et al.	10,8	0,07	39,1	16	0,28	40,5	6,7	0,99	41,3	26,1	370
Maier	12,6	0,09	19,9	8,6	0,16	11,6	5,3	0,65	31,5	28,5	320
Grobasche											
Maier et al.	15,2	0	154,8	70,4	0	193,1	13,3	0,6	92,8	38,9	380
Maier	8,8	0	204,7	63,2	0	214,9	9,9	0,6	96,6	38,9	
TSP 6.5.91	19	0,2	133	77	<0,05	105	6,3	0,5	193	76	
Flugasche											
Maier et al.	43,9	0,295	154,5	67,6	0,1	158,7	27,7	1,4	169	116,1	390
Maier	106	0,74	194,9	88,4	0,86	90	45,2	2,8	263,6	236,1	320
TSP 6.5.91	>50	1	<200	90	<1	90	50	3	250	200	200
Kalk											
Maier et al.	0,25	0	5,7	5,2	0,1	16,7	0,95	0	4	8,3	320
Maier	0,3	0	5,5	5,7	0,1	17,1	1	0	4,5	8,3	
Gips											
Maier et al.	1,2	0	4,1	4,2	1,7	4,2	0,7	2,2	3,4	6,7	670
Maier	1,8	0,01	35,4	3,2	0,39	1,1	0,8	6,8	4,2	6,7	
Schöngrundner et al.	2-3	<0,01	3-5	2-4	<1,5	1-4	1-2	2-6	3-4	5-9	
Kahl*	1,3	0,07	3,4	3,1	0,6	2,5	5,5	n.b.	n.b.	15	
Naturgips											
Kahl	1,7	0,17	7,5	5,5	0,03	4,4	4	n.b.	n.b.	13	
Staub im Reingas											
Maier et al.	207,8	1,7	931	241,4	0,3	172,4	34,5	2000	241	1138	670
Reingas											
	[µg/m³]										
Maier	1,2	0,8	3	28,5	17,3	2,9	6	22,9	0	51	

*[Kahl 1993]

Die Verschiebung zugunsten des Zinks im Zink-Cadmium Verhältnis des Reingasstaubes verglichen mit demjenigen in der Flugasche erscheint fragwürdig. Weiters ist aus den Analysedaten der hohe Quecksilbergehalt im REA-Gips ersichtlich. Hier sollte eventuell eine beschränkte Einsatztauglichkeit für bestimmte Anwendungsbereiche in Betracht gezogen werden.

VIII. Berechnung der Transferkoeffizienten

Die Transferkoeffizienten beschreiben die Verteilung eines Gutes oder Stoffes und die Transformation innerhalb eines Prozesses auf verschiedene Produkte. Mit Hilfe der Transferkoeffizienten lassen sich die Ergebnisse der Stoffbilanzierung in einer ausgesprochen kompakten Form darstellen.

IX. Numerische und graphische Darstellung der Resultate einschließlich detaillierter Berichterstattung

6. Vorgehen für eine Einbettung des Kraftwerkes in die Region

Gemäß einem der Ziele dieser Machbarkeitsstudie, die Möglichkeiten zu untersuchen, wie das System "Kraftwerk & Peripherie" quantitativ und qualitativ zu den Flüssen der "Region" in Beziehung gesetzt werden kann, werden zunächst zwei Hauptansätze zu einer plausiblen Definition des Begriffes "Region" vorgestellt. Danach wird exemplarisch für einen der Ansätze eine Systemanalyse durchgeführt, und das weitere Vorgehen für die zukünftige Bilanzierung diskutiert. Abschließend wird anhand der Ergebnisse dieser Vorstudie der Beitrag des Kraftwerkes zu den regionalen Stoffflüssen grob abgeschätzt. Dabei werden auch Unterschiede in den Regionsansätzen ersichtlich.

6.1 Ansätze zur Auswahl der Region

Um das Ziel, Kraftwerk einschließlich Peripherie in eine "umgebende" Region einzubetten, muß zunächst der Begriff der Region näher definiert werden. Vorausschickend muß zu dieser Definition folgendes festgestellt werden: Es gibt keine wissenschaftlich exakten Modelle um den Einwirkungsbereich einer industriellen Anlage auf seine Umgebung befriedigend beschreiben zu können. Somit bleibt nur der Einsatz aufwendiger (und zahlreicher) Messungen um gute Informationen zur Belastungssituation einer Region zu erhalten. Ein weiteres Problem besteht darin, die Schadstoffe einem bestimmten Verursacher zuzuordnen. Trotzdem ist es möglich, für die im Kapitel 5 dargestellte Methode der Stoffflußanalyse, zu sinnvollen Definitionen einer Region zu kommen. Dazu sind, je nach Fragestellung und Blickwinkel, mehrere Ansätze denkbar, die auch im Prinzip miteinander verknüpft werden können. Diese sollen in der Folge kurz beschrieben werden.

6.1.1 Produktbezogener Ansatz

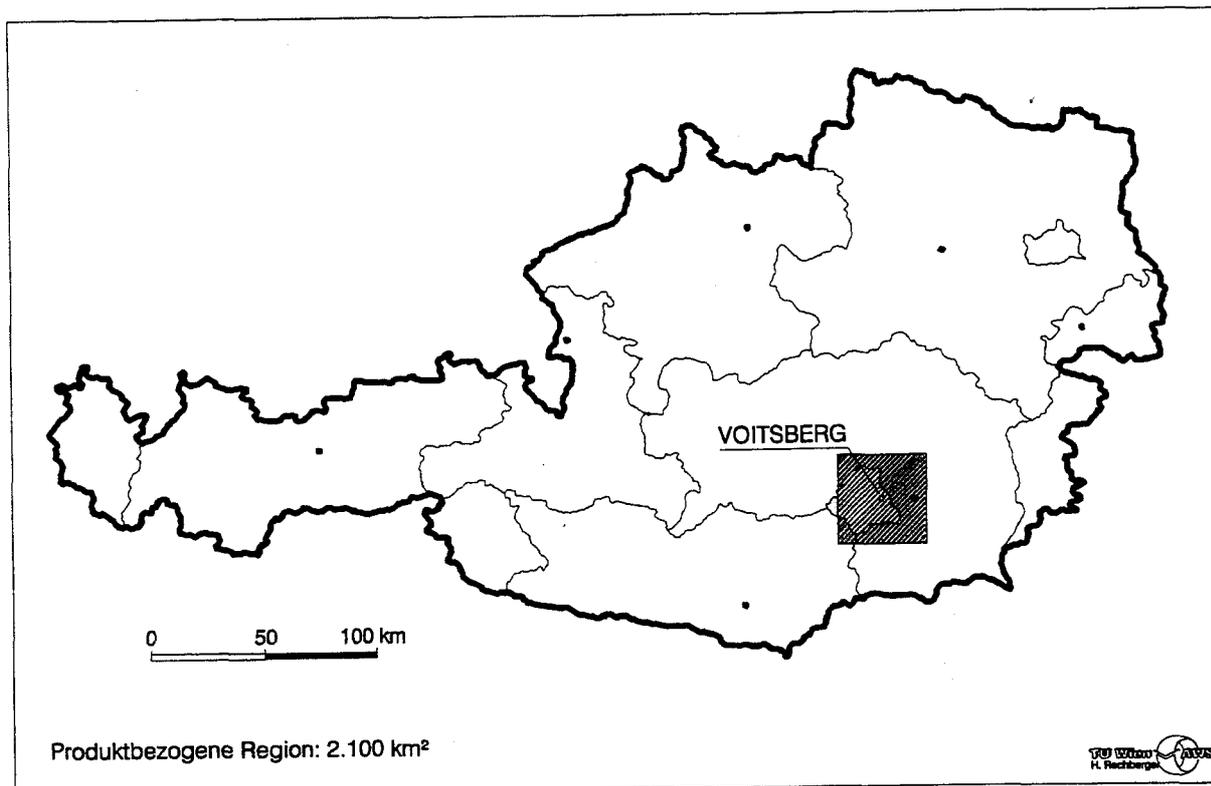
Im ersten Ansatz wurde für eine Definition der Region das Produkt "Strom" herangezogen. Es wurde dabei von folgender Überlegung ausgegangen: Das Kraftwerk Voitsberg 3 versorgt eine bestimmte Anzahl von Einwohnern mit Strom, wobei angenommen wurde, daß das Kraftwerk nicht nur Spitzen- sondern auch Grundlaststrom erzeugt. Kennt man den Pro-Kopf-Verbrauch an Strom in Österreich, dann läßt sich über die mittlere Bevölkerungsdichte die zugehörige Fläche der Region berechnen. Hinter diesem Ansatz steckt die Idee, daß in Hinblick auf das Produkt "Strom" die strikte Lokalisierung der räumlichen Systemgrenzen als geographische Grenzen eines Gebietes nicht naheliegend ist. Vielmehr spiegelt dieser Regionsbegriff den Anteil am statistischen Durchschnitt Österreichs wieder, der ausschließlich durch das Kraftwerk mit Strom versorgt werden kann. Eine so definierte Region hat überdies den Vorteil, daß österreichweit erhobene Daten für eine erste grobe Abschätzung der Verhältnisse problemlos auf sie umgelegt werden können. Laut Konstruktion der Region wird in

dieser Variante auf spezifische regionale Bedingungen des Bezirkes Voitsberg nicht eingegangen.

Die Nettostromerzeugung des Kraftwerkes wurde aus den Betriebsdaten für die Jahre 1987 bis 1993 für ein "Normbetriebsjahr" mit 4.000 Betriebsstunden berechnet. Sie beträgt 1.100 GWh/a bei einer Fernwärmeauskopplung von 46 GWh/a (s. Tab.7). Der durchschnittliche Strombedarf pro Einwohner und Jahr beträgt 5630 kWh/E.a [Bundeslastverteiler]. Diese Zahl bezieht sich auf den Gesamtstromverbrauch pro Kopf und Jahr in Österreich, inkludiert also nicht nur die privaten Haushalte, sondern auch Industrie (ohne Eigenproduktion), Handel, Gewerbe, Verkehr und die Landwirtschaft: Die vom Kraftwerk mit Strom versorgbare Einwohnerzahl beläuft sich demnach auf zirka 200.000. **Bei einer mittleren österreichischen Bevölkerungsdichte von 95 E/km² ergibt sich somit eine zugehörige Fläche von 2.100 km².**

Im Prinzip sind mehrere Modifikationen dieses Ansatzes denkbar. Ausgehend von der Problemstellung, den Anteil der Stoffflüsse durch die privaten Haushalte dem Stoffumsatz des Kraftwerkes und seiner Peripherie gegenüberzustellen, kann man den pro Kopf Stromverbrauch der privaten Haushalte heranziehen um eine geeignete (größere) Region zu definieren (s. Kap. 6.4, *Vergleich der Schwermetallflüsse Kraftwerk - "produktbezogene" Region*). Weiters ist es denkbar, den österreichischen pro Kopf Verbrauch an Spitzenstrom heranzuziehen, und diesen Anteil bezüglich Wärmekraft und Speicherkraft aufzuschlüsseln. Für die Regionsdefinition im Sinne der "produktbezogenen" Region soll dann der Wärmekraftspitzenanteil herangezogen werden. Im Kapitel 6.4 wird auf die "produktbezogene" Region und eine ihrer Modifikationen Bezug genommen.

Abb.16: Abbildung der "produktbezogenen" Region



6.1.2 Stoffbezogener Ansatz

Ein weiteres Abgrenzungskriterium, das zu einer nützlichen Definition des Begriffes "Region" herangezogen werden kann, bildet die Einwirkung von "Kraftwerk & Peripherie" auf die Umweltkompartimente Boden, Wasser und Luft. Dabei wird die Region für jedes Kompartiment neu festzulegen und von unterschiedlicher Ausdehnung sein.

Um die Einwirkung des Kraftwerkes auf den Wasserhaushalt und die Wassergüte der Region abzuschätzen, muß der lokale Wasserhaushalt bekannt sein. Für diese Betrachtung werden die Grenzen einer "hydrologischen Region" in natürlicher Weise durch die räumlichen Grenzen der Grundwasservorkommen und die Einzugsgebiete der Oberflächengewässer (Wasserscheide) determiniert. Nur in Ausnahmefällen wird das hydrologische Einzugsgebiet mit den Grenzen der Organisationseinheit "Bezirk" zusammenfallen.

Die Definition der "atmosphärischen Region", die von der Einwirkung des Kraftwerkes auf die Atmosphäre und in weiterer Folge durch Deposition auf den Boden ausgeht, ist stoffspezifisch. Die Ausbreitung der atmosphärischen Inhaltsstoffe hängt von der durch die Teilchengröße bestimmten Aufenthaltszeit ab. So besitzen beispielsweise Aerosole (Teilchen $< 0,2\mu\text{m}$) eine mittlere Aufenthaltszeit von einer Woche und verteilen sich damit über eine Region von 1 Mio km^2 , Sedimentstäube $> 100\mu\text{m}$ dagegen setzen sich schnell ab ($< 1\text{h}$) und verteilen sich daher über eine rund

25.000 mal kleinere Region. Die Aufenthaltszeit von gasförmigen Spurenstoffen ist wiederum durch ihre chemische Umwandlung in der Atmosphäre bestimmt.

Für alle stoffbezogenen Ansätze gilt gleichermaßen, daß eine Einbeziehung der Prozesse der Anthroposphäre, wie Industrie, Gewerbe etc. in die Betrachtungen zu Komplikationen in bezug auf die Datenverfügbarkeit führt, da die so definierten "Regionen" meist nicht mit den politischen Erhebungs- und Verwaltungseinheiten übereinstimmen. Daher eignet sich dieser stoffbezogene Ansatz vorläufig vor allem für eine differenzierte und isolierte Fragestellung. In Zukunft ist zu erwarten, daß auch für andere Branchen vermehrt stoffliche Daten vorliegen werden, die ein Gegenüberstellen der Stoffflüsse aus verschiedenen anthropogenen Quellen erlauben und damit auch das Setzen von Prioritäten für Maßnahmen ermöglichen.

6.1.3 Verknüpfung der Ansätze

Die oben geschilderten Ansätze zur Definition des Begriffes "Region" orientierten sich an verschiedenen Abgrenzungskriterien, die abweichend vom traditionellen Ansatz der geographisch-administrativen Verwaltungseinheit (z.B. Bezirk), von stofflichen (stoffbezogener Ansatz) und energetisch-volkswirtschaftlichen (produktbezogener Ansatz) Standpunkten ausgehen. **Je nach Fragestellung und Blickpunkt wird von Fall zu Fall der Begriff der Region gemäß den hier geschilderten Ansätzen am zweckmäßigsten neu gefaßt werden müssen.**

Die hier geschilderten Definitionsmöglichkeiten sind größtenteils komplementär. Sie lassen sich auf verschiedenste Weisen verknüpfen. Beispielsweise könnte man etwa den Wasserhaushalt der "produktbezogenen" Region aus den entsprechenden korrigierten Daten für Österreich ermitteln (Minderungsfaktor = Flächenquotient $2.100/83.000$), und dann aus der Wasserbilanz dieser Region das Verdünnungspotential für die Emissionen von Kraftwerk und Bergbau in die Oberflächengewässer ermitteln. Das verknüpft den produktbezogenen mit dem stoffbezogenen Ansatz.

6.2 Systemanalyse der Region

Nach diesen einführenden Betrachtungen über die verschiedenen Ansätze zur Definition der Region soll in der Folge eine Systemanalyse für die "produktbezogene" Region durchgeführt werden. Die Wahl des zeitlichen Bilanzraumes beträgt wieder wie üblich ein Jahr. In Anlehnung an das Vorgehen bei Kraftwerk und Bergbau bleibt es aber zu untersuchen, ob bei Vorliegen der notwendigen Daten in Form einer Zeitreihe über mehrere Jahre eine Mittelung über die Stoffflüsse vorgenommen werden kann. Dies wäre vor allem für die Jahre, in denen über den Kraftwerksbetrieb gemittelt wurde, wünschenswert. In Anbetracht der relativ raschen strukturellen Veränderung der Region, bleibt die Möglichkeit eines solchen Vorgehens allerdings einer eingehenden Prüfung der Datenlage vorbehalten. Notwendige Voraussetzung für einen einigermaßen sinnvollen Mittelungsprozeß über mehrere Jahre ist die Bedingung, daß die zu

untersuchenden Flüsse über diese Zeiträume keine eindeutigen und anhaltenden Wachstums- oder Schrumpfungstendenzen bzw. Trends erkennen lassen.

Abbildung 17 zeigt die Systemanalyse der Region, bestehend aus den Prozessen "Anthroposphäre", "Atmosphäre", "Pedo-/Lithosphäre" und "Hydrosphäre". Der komplexe Prozeß Anthroposphäre, der sämtliche Aktivitäten, Prozesse, Güter- und Stoffflüsse des Menschen in der Region umfaßt, zerfällt in die Subprozesse "primärer Sektor", "sekundärer Sektor", "tertiärer Sektor" und die "privaten Haushalte". Kraftwerk und Bergbau erscheinen dabei als Subprozesse des sekundären Sektors. Die Pfeile in der Abbildung deuten summarisch die Verflechtungen der Prozesse untereinander und damit die potentiellen Güterflüsse an. Weiters ist die Region über anthropogene und geogene Importe und Exporte mit dem sie umgebenden Territorium in Wechselwirkung. In der Folge sollen die Prozesse überblicksmäßig beschrieben werden.

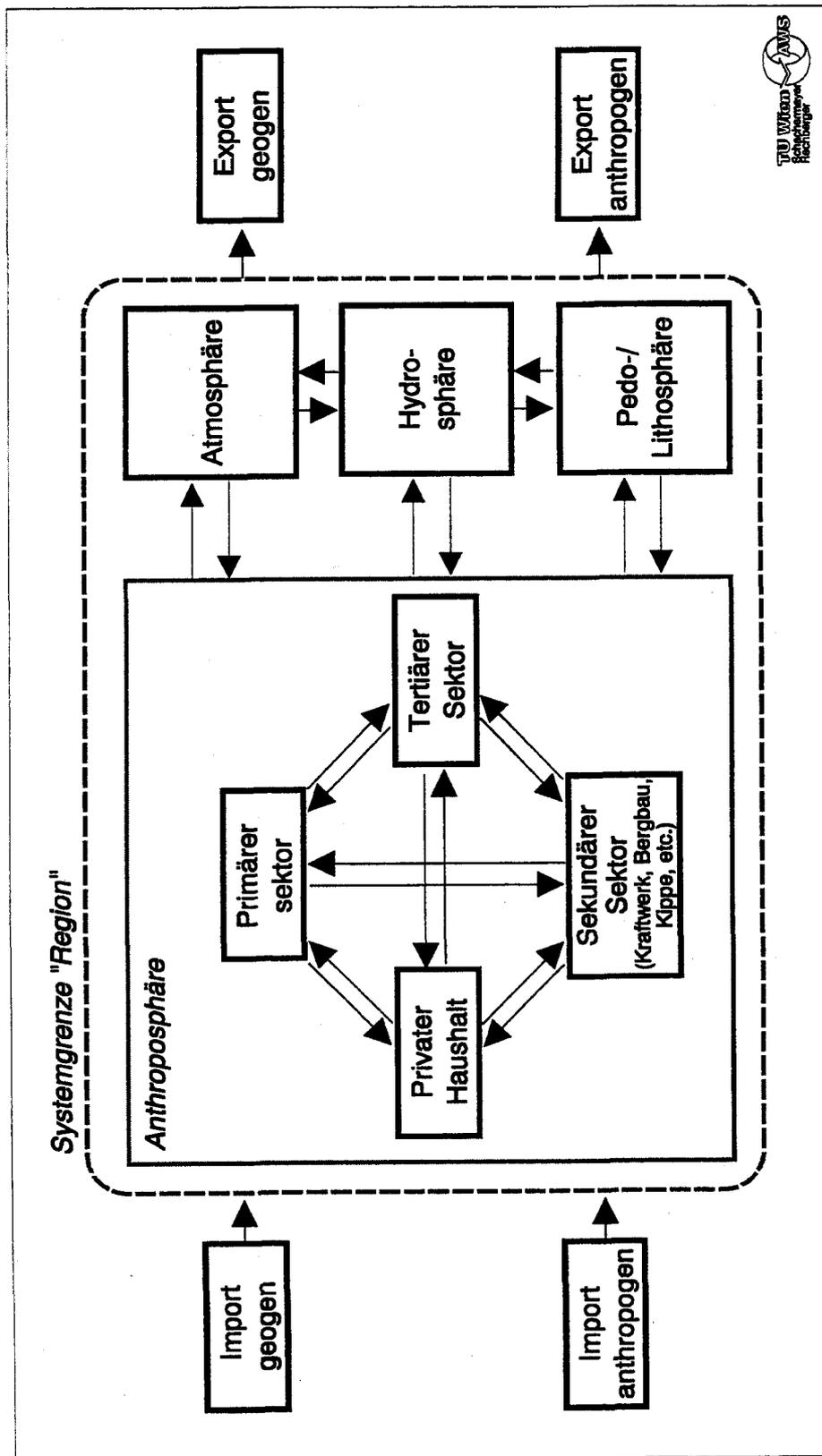
Der Prozeß "**Atmosphäre**", der in vorangegangenen Studien auch als "planetare Grenzschicht" bezeichnet wurde [Brunner et al.], umfaßt die etwa 500 m dicke, an den Boden angrenzende Luftschicht der Atmosphäre. Dieser Prozeß tauscht mit dem Prozeß "Anthroposphäre" die Güter Luft und Verbrennungsluft, Wasserdampf (vor allem in der Kühlturmabluft), sowie Partikel und Staub, und mit dem Prozeß Pedo-/Lithosphäre Wasserdampf, nassen und trockenen Niederschlag in Form von Regen bzw. Partikel, Staub und Gasen aus.

Der Prozeß "**Pedo-/Lithosphäre**" umfaßt den Boden, das Muttergestein und in einer weiter gefaßten Auslegung die Gesamtheit aller Lebewesen und Pflanzen sofern diese nicht anderen Prozessen wie etwa dem primären Sektor (Land- und Forstwirtschaft) oder den übrigen Prozessen der Anthroposphäre zuzuordnen sind. Mit den übrigen Umweltkompartimenten werden vor allem die Güter Wasser und Luft, mit der Anthroposphäre vor allem die Güter Steine, Erden und Kohle ausgetauscht.

Der Prozeß "**Hydrosphäre**" umfaßt Grund- und Oberflächengewässer der Region. Als Güter sind vor allem Niederschläge, Verdunstungs-, Grund-, Oberflächen-, Ab- und Trinkwasser zu nennen, die mit den übrigen Prozessen ausgetauscht werden.

Der Prozeß "**Primärer Sektor**" umfaßt Land und Forstwirtschaft. Als In- und Outputgüter sind vor allem tierische und pflanzliche Biomasse, Dünger und Wasser in Form von Niederschlägen von Bedeutung.

Abb.17: Systemanalyse der Region [nach Baccini, P. & Brunner, P.H.]



Der Prozeß "Sekundärer Sektor" umfaßt die Betriebe aller Branchen des Produktionssektors. Kraftwerk und Bergbau sind Teilprozesse des sekundären Sektors. Die Güter werden zusammengefaßt in Input- Output und Restgüter. Zu den Inputgütern zählen vor allem die Roh-, Betriebsstoffe (inklusive Wasser) und die Luft. Die herge-

stellten Produkte werden als Outputgüter bezeichnet und die Restgüter setzen sich aus Produktionsabfällen, dem Abwasser und der Abluft zusammen.

Der Prozeß "**Tertiärer Sektor**" umfaßt Handel, Gastgewerbe, Reparaturgewerbe, Verkehr, Nachrichtenübermittlung, Immobilien, Banken, Versicherungen und sonstige private und öffentliche Dienstleistungen. Das Güterspektrum, das mit diesem Prozeß verknüpft ist, ist äußerst vielfältig. Mengenmäßig fallen die meisten dieser Güterflüsse (mit Ausnahme etwa der fossilen Energieträger) gegenüber den Flüssen durch die anderen Sektoren nicht ins Gewicht.

Der Prozeß "**Private Haushalte**" umfaßt alle privaten Haushalte der Region. Die Güter werden in Input und Outputgüter zusammengefaßt. Zu den Inputgütern zählen neben den Ge- und Verbrauchsgütern (inklusive Wasser) die Luft, die Baumaterialien und jene Güter, die für den Bau der Infrastruktur notwendig sind.

Die Herkunfts- und Zielprozesse "**Import/Export anthropogen**" umfassen alle vom Menschen verursachten Stoffflüsse über die Systemgrenze der Region. Es handelt sich in diesem Fall um Import und Export von Gütern, die meist über Produktion und Handel ablaufen.

Die Herkunfts- und Zielprozesse "**Import/Export geogen**" umfassen alle nicht unmittelbar von Menschen verursachten Stoffimporte und Stoffexporte von den Umweltkompartimenten der Region zu den Umweltkompartimenten außerhalb der Systemgrenzen.

Möglicherweise sollte noch zusätzlich der Prozeß "Abfallwirtschaft" eingeführt werden. Dies ist aber abhängig von der Größe der Region und kann auf Grund unseres heutigen Wissensstandes noch nicht eindeutig entschieden werden.

6.3 Bestimmung der wichtigsten Anteile von Kraftwerk und Peripherie an den Flüssen der Region

Zur Bestimmung der wichtigsten Anteile von "Kraftwerk & Peripherie" an den Flüssen der Region kann nicht so weit gegangen werden ihren Stoffwechsel vollständig zu bilanzieren. Es müssen vielmehr die relevanten Prozesse und Güterflüsse in der Region, bezogen auf die jeweilig zu untersuchenden Stoffe, identifiziert und abgeschätzt, und in einem iterativen Verfahren bilanziert werden. Eine erste Entscheidungsgrundlage für die Relevanz der Güterflüsse in der Region in bezug auf die zu untersuchenden Elemente, liefern die vorläufigen Güter- und Stoffbilanzen von Kraftwerk und Bergbau. Eine nähere Betrachtung der Güterflüsse hinsichtlich deren stofflicher Zusammensetzung ist daher hauptsächlich für **jene Güter- und Stoffflüsse interessant, an denen die Flüsse von "Kraftwerk & Peripherie" einen relevanten Anteil haben.**

Erfahrungsgemäß werden für einen ersten Überblick die massenmäßig relevanten Güterströme durch die Anthroposphäre einer Region durch eine Beschränkung auf Industrie, Gewerbe, Bauwirtschaft (sekundärer Sektor), Verkehr (tertiärer Sektor), Landwirtschaft (primärer Sektor) und die privaten Haushalte sehr gut erfaßt [Lauber 1993].

Für diese Art der Bilanzierung, die nicht die Gesamtheit aller Güter durch die Region erfassen will und kann, muß die **Güterliste stoffspezifisch** erstellt werden. Für jeden einzelnen Stoff müssen daher jene Güter identifiziert werden, die zu einem relevanten, das heißt, verglichen mit den Flüssen aus Kraftwerk und Bergbau, nicht zu vernachlässigenden Stofffluß führen. Dazu ist es notwendig, einen groben qualitativen Überblick über das Produktspektrum der Region zu haben, um dann anhand dessen, zusammen mit quantitativer Information, die Auswahl der relevanten Güter durchzuführen.

In der Arbeit von Lauber wird diese Methodik angewendet. Für das zu untersuchende Element Kohlenstoff beispielsweise liefert diese Betrachtung eine Einschränkung auf die folgenden Klassen von Gütern:

- fossile Brennstoffe
- Biomasse aus Land- und Forstwirtschaft
- Kunststoffe

als Inputgüter und

- Abgas
- Abwasser
- Schlacke und Asche
- Produkte der chemischen- und Nahrungsmittelindustrie
- Abfall und Bioabfall

als Outputgüter aus der Anthroposphäre.

⇒ Für ein weiteres Vorgehen müssen stoffspezifische Listen erstellt werden, in denen Herkunfts- und Zielprozesse der oben angeführten Klassen von Gütern (für das Beispiel Kohlenstoff) aufgelistet, die Massenflüsse angegeben, und die Stoffkonzentrationen eingetragen sind. Daraus ergeben sich die Massenflüsse des betrachteten Stoffes. Tabelle 9 zeigt, wie eine stoffspezifische Liste für das Element Kohlenstoff auszusehen hat.

Tab.9: Vorlage für eine stoffspezifische Liste für das Element Kohlenstoff

Güterklasse	Gut	C-Gehalt [TS]	Herkunfts- prozeß		Güterfluß pro Jahr							Mittelwert
			Zielprozeß		1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	
fossile Energieträger	Steinkohle		I.a.	S.S.								
			T.S.	P.H.								
			I.a.	T.S.								
			:	:								
	Braunkohle											
	Heizöl											
	Gas											
	Holz											
	Diesel											
	Benzin											
Flüssiggas												
Biog. Brennst.												
Landwirtschaftliche Produkte	tier. Biom.											
	pflanzl. Biom.											
	:											
Kunststoffe												
Produkte der chem. und Nahrungs- mittelindustrie												
Abfälle												
Abwässer												
Abgas												
:												

Legende zur Tabelle 9

- A. Atmosphäre
- P.L. Pede/Lithosphäre
- H. Hydrosphäre
- P.S. Primärer Sektor
- S.S. Sekundärer Sektor
- T.S. Tertiärer Sektor
- P.H. Private Haushalte
- I.a. Import anthropogen
- E.a. Export anthropogen
- I.g. Import geogen
- E.g. Export geogen

Die stofflichen Ein- und Austräge der Umweltkompartimente untereinander sollten erst in einem zweiten Schritt, sofern dies für die Gegenüberstellung der Flüsse des Systems "Kraftwerk & Peripherie" zu den Flüssen der Region überhaupt notwendig erscheint, erfolgen.

Das methodische Vorgehen für die übrigen Stoffe erfolgt analog. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen erscheint es, im Gegensatz zum System "Kraftwerk & Peripherie", **nicht zweckmäßig** ein detailliertes Meßprogramm wie in RESUB zur Messung der **Güterflüsse der Region** durchzuführen. Ein solches sollte den politisch verantwortlichen Stellen im Land selbst vorbehalten bleiben. Vielmehr sollte aufgrund verfügbarer Daten die Stoffbilanz der Region erstellt werden.

6.4 Erste Abschätzung der Anteile des Kraftwerkes an den Stoffflüssen der "produktbezogenen" Region

In diesem Kapitel werden auf Basis bereits vorhandener Daten (Elementaranalysen etc.) bzw. rasch verfügbarer Daten (Werte für Österreich, Literatur, etc.) erste, zum Teil grobe Abschätzungen über den Einfluß des Kraftwerkes auf die "produktbezogene" Region gemacht. Auf die Qualität eines Teiles dieser Daten wurde bereits im Kapitel 5 ausführlich eingegangen.

Ausdrücklich sei an dieser Stelle betont, daß alle Ergebnisse dieses Kapitels nur als vorläufige Abschätzungen, im Sinne einer Machbarkeitsstudie, verstanden werden dürfen, da zum Teil von zeitlich singulären Informationen auf große Zeiträume hochgerechnet wurde und mit dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial nicht einmal die Möglichkeit einer Fehlerabschätzung besteht.

Vergleich der Schwermetallflüsse Kraftwerk - "produktbezogene" Region

Für diese Abschätzung wurde der Regionsbegriff im Sinne der oben definierten "produktbezogenen" Region leicht modifiziert, wie im folgenden kurz dargestellt ist. Die Jahresstromerzeugung von Voitsberg 3 beträgt für die im Kapitel 5 erläuterten Ausgangsbedingungen 1.100 GWh/a (s. Tab.7). Mit dem pro Kopfbedarf an Strom (Für diese Betrachtung wurde nur der Stromverbrauch im Haushalt herangezogen) von 1.543 kWh/a (Bundeslastverteiler, telefonische Auskunft) ergibt sich eine von der in 6.1.1 beschriebenen Region abweichende Abdeckung von rund 710.000 Einwohnern. Systemmüll (Hausmüll und hausmüllähnlicher Gewerbemüll) spiegelt unter gewissen Einschränkungen (Lagerbildung wird nicht berücksichtigt) die Schwermetallstoffströme durch den privaten Haushalt (PHH) wieder. In Tabelle 10 wurden die jährlichen Stoffflüsse durch den privaten Haushalt (Gesamtmenge 210 kgTS/E*a Systemmüll) mit den Stoffflüssen im Gut Kohle verglichen, wobei auf die oben ermittelten, mit Strom versorgten Einwohner, normiert wurde. Bei den Elementen Schwefel und Kohlenstoff wurden die Inputdaten für fossile Energieträger [Metapolis] in den privaten Haushalt zu den Angaben im Müll hinzugerechnet, da diese in der Müllzusammensetzung nicht aufscheinen. Der Vergleich der Stoffflüsse weist die Kohle als Quelle für Arsen, Selen und Schwefel aus.

Tab.10: Vergleich der an das Gut Kohle gebundenen Stoffflüsse mit den Stoffflüssen durch den privaten Haushalt

	Konzentration in der Kohle**	jährlicher Elementenfluß pro Einwohner über Kohle	Konzentration im Systemmüll***	jährlicher Elementenfluß pro Einwohner über Systemmüll (PHH)	Faktor Elementenfluß (Kohle/PHH)
Element	mg/kg	g/Ea	mg/kg	g/Ea	
Arsen	12	18	4	0,8	21
Kupfer	13	19	480	101	0,2
Blei	6	9	810	170	0,1
Cadmium	0,1	0,15	11	2,3	0,1
Quecksilber	0,3	0,45	1,8	0,4	1,2
Selen	0,9	1,3	0,8	0,2	8
Chrom	30	45	250	53	0,9
Nickel	27	40	85	18	2,3
Vanadium	35	52	k.A.	k.A.	k.A.
Zink	27	40	1.100	231	0,2
Eisen*	14.000	21.000	56.000	11.760	1,8
Kohlenstoff	280.000	420.000	260.000	935.000****	0,4
Schwefel	7.000	10.500	3.800	2.000****	5

* Aus dem Fe₂O₃-Gehalt der Aschen zurückgerechnet.

** Aus Maier bzw. Maier et al. (Mittelwerte)

*** Aus Schachermayer et al. bzw. Reimann bzw. Angenend & Trondt

**** Masse im Müll und in den Energieträgern [Baccini et al.]

Abschätzung der Immissionen durch das Kraftwerk

Für diese Abschätzung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Im Laufe des Betriebszeitraumes des Kraftwerkes werden 35 Mio t Kohle verfeuert. Bei einem Brennstoffverbrauch von 1.060.000 t/a (s. Kapitel 5, Tabelle 7) entspricht das der Dauer von rund 33 Normbetriebsjahren.
- Als Region wird die im Kapitel 6.1.1 definierte Region herangezogen. Es wird angenommen, daß die Schadstofffrachten innerhalb der Region gleichmäßig auf den Boden gelangen. Über die Regionsgrenzen gibt es keinen Import bzw. Export von Schadstoffen. Später soll gezeigt werden, daß diese Annahme einer homo

genen Verteilung der Luftschadstoffe über die ganze Region eine starke Vereinfachung darstellt. Dies folgt auch aus dem weiter unten dargestellten Gauß-Modell (ÖNORM M9440). Aber auch die im Kapitel 6.1.2 dargestellten Überlegungen zur Festsetzung der Systemgrenzen für Immissionsbetrachtungen sind bei der Einschätzung der hier erhaltenen Ergebnisse zu beachten.

- Die Eindringtiefe wurde vereinfachend für alle Spurenelemente gleich 40 cm gewählt. Das entspricht in etwa der Tiefe der Pflugschicht.
- Die Vorbelastung des Bodens in der Region wird nicht berücksichtigt. Für weitere Untersuchungen sollten möglichst Bodendaten der Region, sofern sie existieren, herangezogen werden.

Weiters gilt: Die Konzentration der Spurenelemente in der Kohle sind Mittelwerte aus zwei Analysen aus dem Jahre 1989 [Maier et al., Maier]. Die Transferkoeffizienten für Reingas und Staub sind aus der Arbeit von Maier et al. entnommen und in Tabelle 11 dargestellt.

Tab.11: Verteilung der Spurenelemente auf die Outputgüter des Kraftwerkes

%	Input		Output				
	Kohle	CaCO ₃	Flugasche	Grobasche	Gips	Reingas	Staub em.
Arsen	100,0	0,0	99,1	0,4	0,4	<0,1	<0,1
Kupfer	98,9	1,1	94,3	3,6	0,8	1,4	<0,1
Blei	99,6	0,4	98,0	1,1	0,4	0,5	<0,1
Cadmium	100,0	0,0	95,5	0,0	0,4	4,1	0,0
Quecksilber	99,1	0,9	50,2	0,0	5,0	44,8	0,0
Selen	100,0	0,0	51,7	0,6	27,9	16,4	3,4
Chrom	99,6	0,4	91,2	5,1	3,6	0,1	0,0
Nickel	97,3	2,7	88,7	10,8	0,2	0,1	0,2
Vanadium	99,7	0,3	97,8	1,8	0,3	0,0	0,1
Zink	99,5	0,5	97,7	0,8	0,6	0,8	<0,1

In den ersten beiden Spalten findet sich die Aufteilung der Elemente auf die beiden Güterströme Kohle und Kalkstein für REA2 (das TAV war zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht im Einsatz), die die betrachteten Stoffe in das System Kraftwerk einschleusen. Maier et al. definieren in ihrer Arbeit den Begriff der Wiederfindungsrate. Sie liegt, auf die Arbeit von Maier angewendet, für alle Elemente überraschend nahe der 100% Marke, das heißt, daß alle Elemente in den Outputströmen durch Messung beinahe vollständig wiedergefunden wurden. In dieser Arbeit wurden die Transferkoeffizienten wie folgt definiert:

$$k_i = \frac{X_{ei, out}}{\sum_i X_{ei, out}} \quad i=1 \dots n \quad n \text{ Outputströme}$$

Dadurch verteilt sich der Fehler bei einer Wiederfindungsrate abweichend von der 100% Marke auf alle Outputströme, und die Summe der $X_{e, out}$ ergibt 1. Hieraus erklä-

ren sich die geringfügigen Abweichungen in den Prozentangaben zur Arbeit von Maier.

Weiters ist zu beachten, daß, wie in der Arbeit von Maier gezeigt wird, die Filtereigenschaft der REA2 für Quecksilber und Selen erst 3 Jahre nach Inbetriebnahme des Kraftwerkes zum Tragen gekommen ist.

Tab.12: Abschätzung der vom Kraftwerk in 33 Jahren verursachten Immissionen

Konzentration Kohle*	Transferkoeffizient Reingas und Staub	Masse im Betriebsztr.** durch den Schornstein	Immissionsbelastung der "produktbez." Region	Immission pro kg Boden	Minimalwert***	Maximalwert***	Zunahme zum Minimalwert	Zunahme zum Maximalwert
g/t	%	t	mg/m ²	µg/kg	mg/kg	mg/kg	%	%
12	0,1	0,24	0,2	0,3	0,1	20	0,3	0,0
6	0,5	1,05	0,5	0,7	0,1	20	0,7	0,0
0,1	4,1	0,14	0,068	0,1	0,01	1	1,0	0,0
30	0,1	1,05	0,5	0,7	2	50	0,0	0,0
13	1,4	6,37	3,0	4,4	1	20	0,4	0,0
0,9	19,8	6,24	3,0	4,4	0,01	5	44,1	0,1
27	0,9	8,51	4,1	6,0	3	50	0,2	0,0
27	0,3	2,84	1,4	2,1	2	50	0,1	0,0
0,3	44,8	4,70	2,2	3,2	0,01	1	32,4	0,3

* Aus Maier bzw. Maier et al, (Mittelwerte)

** Betriebszeitraum als gesamte Lebensdauer der Anlage (Umsatz des gesamten Kohlevorkommens)

*** Orientierungsdaten für Kulturböden [Kloke]

Für die Elemente Selen und Quecksilber ergibt sich für unbelasteten Boden (Minimalwert) eine signifikante Zunahme der Bodenkonzentration (s. Tabelle 12). Alle weiteren Elemente bleiben unter der 1 % Marke, bezogen auf den Minimalwert.

Dieses Ergebnis muß aber unter folgender Einschränkung betrachtet werden: Wie im Kapitel 5 bereits erläutert wurde, sind die Konzentrationen, auf denen diese Abschätzung aufbaut, nicht unbedingt repräsentativ für den gesamten Einsatzzeitraum des Kraftwerkes und das Ergebnis daher nur als erster Anhaltswert zu verstehen. Weitere Untersuchungen können dieses Bild durchaus noch korrigieren, aber auch die Gültigkeit der Aussagen zu den Schwer- bzw. Halbmetallimmissionen festigen.

Tabelle 13 gibt in Form einer einfachen Sensitivitätsanalyse Auskunft über den Einfluß von Transferkoeffizienten bzw. Stoffkonzentration in der Kohle auf das Ergebnis wieder. Es gilt: Emission = Konzentration x Güterfluß der Kohle x Transferkoeffizient in Reingas und Staub. Das heißt, beide Parameter, Transferkoeffizient wie Stoffkonzentration, haben gleich großen Einfluß auf das Ergebnis. Für die Abschätzung wurden die Transferkoeffizienten mit dem Faktor 1,5 multipliziert, was bei der Größenordnung der Konzentrationen einer Abweichung entspricht die durchaus im Bereich des Möglichen

zu liegen scheint, da eine nur geringe Zunahme des Schadstoffes sich auf die durchwegs kleinen Transferkoeffizienten ins Rauchgas am stärksten auswirken muß. Die Stoffkonzentrationen in der Kohle wurden verdoppelt. Es zeigt sich, daß sich die Änderungen auf das Ergebnis nicht sonderlich stark auswirken und die Problematik unverändert nur für die Elemente Selen und Quecksilber bestehen bleibt.

Tab.13: Sensitivitätsanalyse für die Einflußfaktoren Transferkoeffizient und Stoffkonzentration

	Konzentration in der Kohle* (verdoppelt)	Transferkoeffizient ins Reingas und als Staub (x1,5)	Zunahme zum Minimalwert
	g/t	%	%
Arsen	24	0,2	1
Blei	12	0,8	2
Cadmium	0,2	6,2	3
Chrom	60	1,5	1
Kupfer	26	2,1	1
Selen	1,8	29,7	131
Zink	54	1,4	1
Nickel	54	0,5	0
Quecksilber	0,6	67,2	99

Vergleich der Emissionen Kraftwerk - "produktbezogene" Region

Die Werte für die Region wurden wie folgt berechnet. Die Fläche Österreichs beträgt ca. 83.000 km², die der "produktbezogenen" Region 2.100 km². Die Werte für SO₂, CO, NO_x und Staub (gültig für 1991) wurden dem Umweltkontrollbericht - Teil A des UBA (1993) entnommen. Sie beinhalten die Emissionen durch Kraft- und Heizwerke, Industrie (Verbrennung und Prozesse), Kleinf Feuerungsanlagen, Kfz- Verkehr und Sonstiges. Die Angaben über CO₂- Emission entstammen dem Energie- und Emissionsbericht 1991 für die Bundesländer und Österreich. Die für Gesamtösterreich geltenden Werte wurden mit dem Faktor Region/Bundesgebiet multipliziert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 und Diagramm 2 dargestellt.

Tab.14: Vergleich der Emissionen Kraftwerk - "produktbezogene" Region

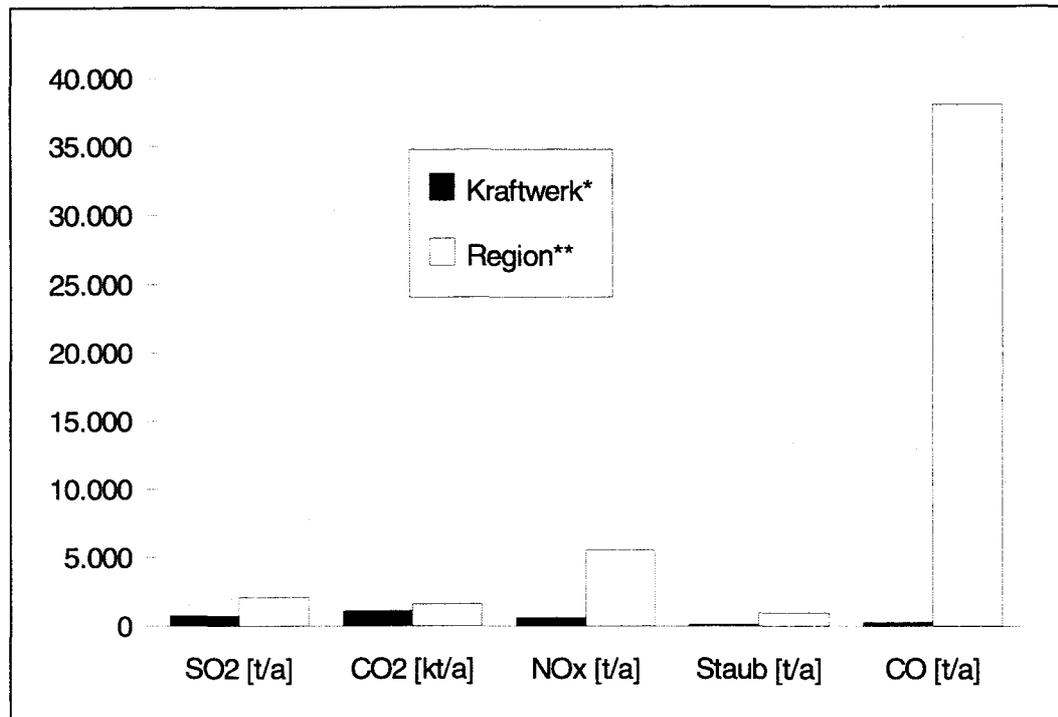
		Kraftwerk*	Region**	Anteil Voitsberg an der Region [%]	Steiermark***
SO ₂	t/a	750	2.100	36	21.000
CO ₂	kt/a	1.100	1.600	69	10.500
NO _x	t/a	620	5.500	11	48.000
Staub	t/a	120	960	13	9.000
CO	t/a	300	38.000	1	210.000

* Kraftwerk - Umweltdaten, Stand 01.01.1994

** Österreichdaten auf Region umgerechnet (ohne Kraftwerk), [Umweltsituation in Österreich, UBA]

*** Daten für Steiermark, [Jilek et al.]

Diagramm 1: Vergleich der Emissionen Kraftwerk - "produktbezogene" Region



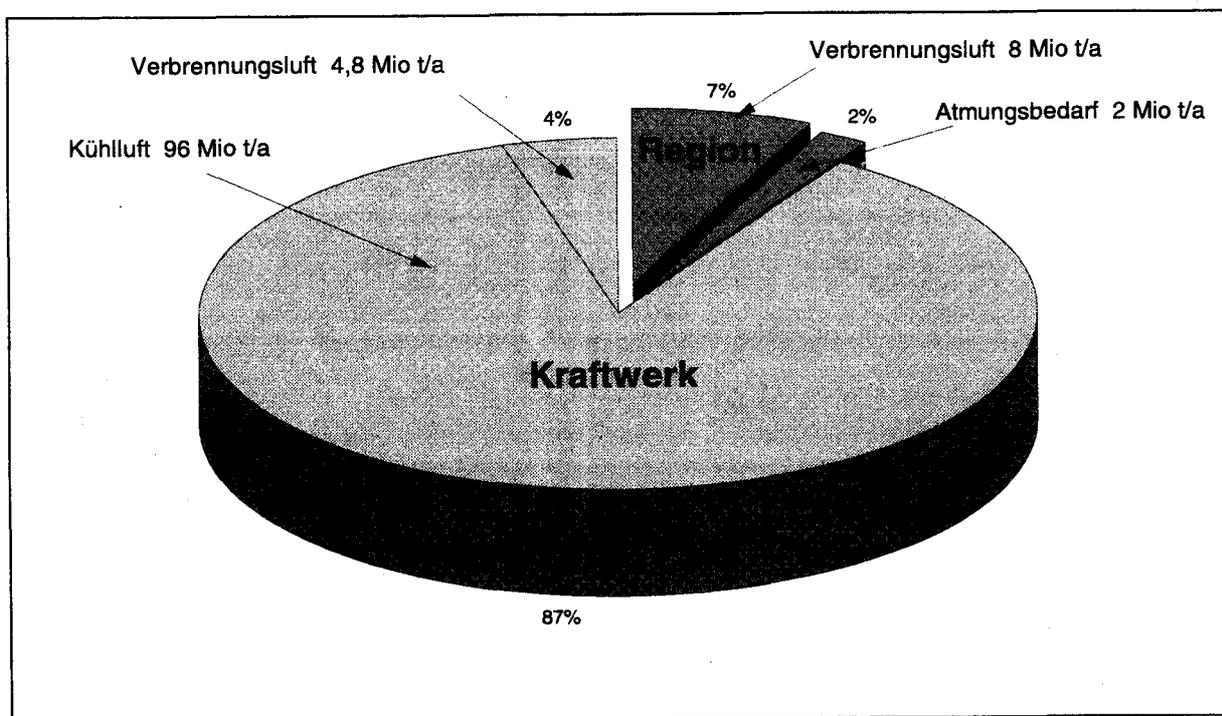
Für die CO₂- und mit Einschränkung auch für die SO₂-Emissionen stellt das Kraftwerk einen beträchtlichen Anteil der Emissionen der Region. Bei Staub, NO_x und CO sind die Beiträge aufgrund der Rauchgasreinigung bzw. effizienteren Verbrennungstechnik gering.

Vergleich des Luftbedarfes Kraftwerk - Region

Betrachtet man hingegen den Luftbedarf, so ist der Kühlturm für die Region bestimmend. Bei einem Betriebsjahr von 4.000 Vollaststunden werden ca 96 Mio t/a Luft für

Kühlzwecke benötigt, das ist rund das 20igfache der eingesetzten Verbrennungsluft. Laut Steurer [Steurer 1992] kommen pro Jahr 40 t Verbrennungsluft auf einen Einwohner. Dazu kommen noch der Atmungsbedarf des Menschen (6 t/E*a) und der Anteil der Viehzucht (4 t/E*a) [Lauber 1993]. Für die "produktbezogene" Region wären das rund 10 Mio t/a. Somit ist der Luftbedarf des Kühlturmes fast eine Größenordnung über dem Bedarf der Region. Es braucht wohl nicht extra betont zu werden, daß die Luft im Kühlturm im Vergleich zum Verbrennungsprozeß nicht chemisch verändert wird. Sie wird bloß erwärmt und mit Wasserdampf angereichert. Hygienisch kann sie laut Angaben in der Literatur [Dubbel 1990] als unbedenklich eingestuft werden.

Diagramm 2: Darstellung des Luftbedarfes von Kraftwerk und "produktbezogener" Region



Substitution von Hausbrand durch Fernwärmeauskopplung

Wie aus Tabelle 7 im Kapitel 5 hervorgeht, können in einem Normbetriebsjahr ca. 46 GWh (166 TJ) thermischer Energie ausgekoppelt werden und als Fernwärme an Haushalte der Umgebung abgegeben werden. Der Einsatz an Energieträgern für Haushaltung und Hauswartung ist aus Tabelle 15 ersichtlich.

Tab.15: CO₂-Substitution durch Fernwärmeauskopplung (brutto)

Energieträger	Güterfluß Österreich*	Heizwert*	Energiefluß Österreich	Energieaufkommen	substituierte Energie	substituierter Güterfluß Region	Stoffkonzentration C**	Stofffluß C
	[1000 t]	[TJ/1000 t]	[TJ]	[%]	[TJ]	[t]	[% C]	[t/a]
Steinkohle	63	28	1.800	1,1	1,9	67	90	60
Braunkohle	200	10,9	2.200	1,4	2,3	211	40	84
Braunkohlebriketts	200	19,3	3.900	2,5	4,1	211	70	148
Koks	440	28,2	12.000	7,5	12,5	444	97	431
Gasöl f. Heizzwecke	1.200	42,5	51.000	32,1	53,3	1.253	85	1.065
Flüssiggas	30	46,3	1.400	0,9	1,5	32		0
Brennholz	3.200	15,5	50.000	31,5	52,2	3.368	50	1.684
	Mio m ³	TJ/Mio m ³						
Stadtgas	28	24,1	670	0,4	0,7	20	50	10
Naturgas	1.000	36	36.000	22,6	37,6	731	75	548
Gesamt			160.000	100	166			4.031
							CO ₂ (gerundet)	15.000

* [ÖSTAT Energieaufkommen und -verwendung in der österreichischen Volkswirtschaft im Jahr 1990 (Haushaltung und Hauswartung)]

** [Baehr 1989]

Es können somit ca. 15.000 t CO₂/a an Hausbrand substituiert werden. Von dieser Menge muß aber noch der der Fernwärme zuzurechnende CO₂-Anteil des Kraftwerkes abgezogen werden. Die Bestimmung dieses Anteiles stellt insofern eine Schwierigkeit dar, da für den CO₂-Ausstoß nur Durchschnittsdaten existieren und Fernwärme nicht kontinuierlich über den gesamten Betriebszeitraum ausgekoppelt wird. Daher wurde wie folgt vorgegangen: Die Betriebsstunden wurden auf äquivalente Vollaststunden umgerechnet und der CO₂-Ausstoß pro Vollaststunde ermittelt. Ebenso wurden äquivalente Fernwärmeauskopplungsstunden (37,5 MW_{th}) berechnet. Der Verlust an elektrischer Leistung durch Auskopplung von Fernwärme (37,5 MW_{th}) beträgt 6,8 MW_{el}. Dieser Verlust (6,8/330) wird mit dem Ausstoß an CO₂ und den Vollastäquivalenten für Fernwärmeauskopplung multipliziert und ist der der Fernwärme zurechenbare Anteil der CO₂-Emissionen durch das Kraftwerk. Auf ein Normbetriebsjahr umgerechnet sind das 7.500 t/a, was der Hälfte des substituierten Hausbrandes entspricht. Es können somit effektiv 7.500 t/a CO₂ substituiert werden. Das Verhältnis für CO₂ von Hausbrand zu Kraftwerk ist also 2:1.

Dies soll durch eine weitere Abschätzung kontrolliert werden. Zunächst wurde der gesamte CO₂-Ausstoß pro MWh elektrischer Leistung für Vollast ermittelt. Dazu wurde die CO₂-Fracht pro Vollaststunde durch die Bruttoleistung des Kraftwerkes (von 330 MW) dividiert und über die Jahre 1987 - 1993 gemittelt (Tab.7, Kapitel 5). Dieser mittlere CO₂-Ausstoß pro kWh_{el}, multipliziert mit dem Minderungsfaktor (6,8/37,5), ergibt einen Fernwärme CO₂-Anteil von 164 gCO₂/kWh_{th}.

In Tabelle 16 sind die CO₂-Emissionen für den Haushalt pro kWh_{th} ermittelt.

Tab.16: Bezogene CO₂-Emission der Haushalte

	Aufteilung der kWh in kJ*	Heizwert*	Brennstoff- einsatz pro kWh	Stoff- konzentration C**	C pro kWh	CO ₂ pro kWh
	[kJ]	[kJ/g]	[g]	[% C]	[g]	[g]
Steinkohle	41	28	1,5	90	1,3	4,8
Braunkohle	50	10,9	4,6	40	1,8	6,7
Braunkohlebriketts	88	19,3	4,6	70	3,2	11,7
Koks	272	28,2	9,6	97	9,3	34,3
Gasöl f. Heizzwecke	1.155	42,5	27,2	85	23,1	84,7
Flüssiggas	32	46,3	0,7	75	0,5	1,9
Brennholz	1.132	15,5	73,1	50	36,5	133,9
Stadtgas	15	34	0,4	50	0,2	0,8
Naturgas	815	51	15,9	75	11,9	43,6
Gesamt	3.600				CO₂ (gerundet)	322

* [ÖSTAT Energieaufkommen und -verwendung in der österreichischen Volkswirtschaft im Jahr 1990 (Haushaltung und Hauswartung)]

** [Baehr]

Der Vergleich der beiden Werte (164 bzw. 322 gCO₂/kWh_{th}) bringt den bereits oben berechneten Faktor 2. Zu bemerken ist noch, daß für Fernwärme und Kleinf Feuerungsanlagen keine Leitungsverluste bzw. Abgasverluste angenommen wurden.

Die Substitution von SO₂ wurde mangels genauer Kenntnis der Aufteilung der im Haushalt eingesetzten Brennstoffe wie folgt abgeschätzt: Der der Fernwärmeauskopplung zuzurechnende SO₂-Anteil wurde analog zum CO₂-Anteil ermittelt. Für die Region wurden Werte für die Steiermark [Umweltsituation in Österreich, UBA; Jilek et al.] herangezogen. Die Vorgangsweise ist aus Tabelle 17 ersichtlich.

Tab.17: SO₂-Substitution durch Fernwärmeauskopplung (brutto)

CO ₂ substituiert	CO ₂ Steiermark Haushalt	Substitution in %	SO ₂ - Anteil Hausbrand	SO ₂ Steiermark	SO ₂ Steiermark Haushalt	SO ₂ substituiert
t/a	t/a	%	%	t/a	t/a	t/a
15.000	2.400.000	1	23	21.000	4.800	30

Von der Substitution des CO₂ wurde auf die von SO₂ geschlossen. Es können also 25 tSO₂/a (30 t/a Region - 5 t/a durch das Kraftwerk, s. Tabelle 7 in Kapitel 5) vermieden werden. Die Bilanz ist bei SO₂ durch die effektive Rauchgasreinigung noch wesentlich besser als bei CO₂.

Umgerechnet auf den Bezirk Voitsberg (Österreich-Emissionen x Flächenfaktor 678/2.100) ergibt sich für ein Jahr von 4.000 Betriebsstunden des Kraftwerkes durch die Auskopplung von Fernwärme bei CO₂ eine Reduktion von 1,4% und bei SO₂ von 3,7%. Daraus folgt, daß lokal durch Einsatz von Fernwärme die Luftsituation verbessert werden kann.

Lagerbildung im Karlschacht 2

Die im Karlschacht 2 verkippte Asche stellt auf Grund ihrer Menge für die Region ein beträchtliches anthropogenes Lager an Schwermetallen dar (s. Tabelle 18). Spalte V beinhaltet die hochgerechneten Metallager nach Umsatz des gesamten Kohlevorkommens von 35 Mio t.

Tab.18: Vergleich der rückverkippten Asche mit der Erdkruste

	I		II		III		IV		V	
	Grobasche mg/kg	Flugasche mg/kg	Grobasche t	Flugasche t	Aschen t	Aschen mg/kg	Erdkruste* mg/kg	Anreicherungs- faktor		
Arsen	14	70	10	441	451	64,4	1	64,4		
Cadmium	0,1	0,7	0	4	4	0,64	0,2	3,2		
Chrom	160	170	112	1.071	1.183	169	100	1,7		
Kupfer	70	85	49	536	585	83,5	55	1,5		
Quecksilber	0,03	0,5	0	3	3	0,45	0,08	5,7		
Nickel	170	120	119	756	875	125	75	1,7		
Blei	10	40	7	252	259	37	13	2,8		
Selen	0,6	2,4	0	15	16	2,22	0,05	44,4		
Vanadium	130	250	91	1.575	1.666	238	135	1,8		
Zink	150	190	105	1.197	1.302	186	70	2,7		

*[Smith]

Im Vergleich zur Zusammensetzung der Erdkruste ergibt sich in den Aschen eine signifikante Anreicherung bei den Elementen Arsen, Selen und Quecksilber. Es muß daher abgeklärt werden, inwieweit sie durch chemisch-physikalische Prozesse aus ihren Verbindungen mobilisierbar sind.

Volumenbetrachtung von Bergbau und Aschenkippe

Flugasche wird auf ca. 20% angefeuchtet, Grobasche auf ca. 40%, sodaß sich nach Ausschöpfung des gesamten Kohlevorkommens die Masse von 9,7 Mio t Asche ergibt. 35 Mio t Kohle reichen für ca. 33 Normbetriebsjahre. Es entfallen somit ca 1,5 t/a feuchter Asche auf einen Einwohner der "produktbezogenen" Region. Das wiederum entspricht dem 4 bis 5-fachen des jährlichen Anfalles an Hausmüll. Bei einer Einbaudichte von rund 1,1 t/m³ ergibt sich somit ein Endvolumen von 8,8 Mio m³. Dazu im Vergleich betrug das Gesamt-Deponievolumen der Steiermark Anfang 1993 5,1 Mio m³, wobei 4 Mio m³ bereits verfüllt sind [Die Wasser- und Abfallwirtschaft Österreichs 1993]. Das jährlich benötigte Deponievolumen der Steiermark beträgt 400.000 m³/a. Das jährlich anfallende Aschenvolumen (320.000 m³/a) liegt in dieser Größenordnung und entspricht somit beinahe dem Gesamtmüllaufkommen der Steiermark.

Durch den vollständigen Abbau des Kohlevorkommens wird ein Massendefizit von ca. 28 Mio t entstehen. Das entspricht 22 Mio m³ ($\rho_{\text{Kohle}} = 1,3 \text{ t/m}^3$). Bei unverändertem Deponiebedarf in der Steiermark wäre das eine Deponie für die nächsten 55 Jahre. Die durch den Kohleabbau entstehenden Löcher sind demnach beträchtlich.

6.5 Erste Abschätzung der Region für SO₂ im Sinne des "stoffbezogenen" Ansatzes

Die charakteristischen Merkmale des Voitsberg - Köflacher - Beckens sind eine erhöhte Inversionsbereitschaft und geringe mittlere Windgeschwindigkeiten, die besonders im Winterhalbjahr (in diesem Zeitraum wird das Kraftwerk hauptsächlich eingesetzt) nur 1,0 bis 1,5 m/s betragen. Wegen der Abschirmung durch die Alpen bildet sich im Becken ein autochthones Tal - Bergwindssystem mit einem bestimmten Tagesgang der Windrichtungsverteilung und der Windgeschwindigkeit. Nachts und vormittags dominieren talabwärts gerichtete Winde aus dem Sektor West bis Nord, tagsüber talaufwärts, zum Randgebirge hin gerichtete Komponenten. Der Richtungswechsel erfolgt ziemlich rasch, meist innerhalb einer Stunde [Moschitz].

Am Vormittag strömen die Luftmassen in der effektiven Schornsteinhöhe des Kraftwerkes talabwärts Richtung Graz. Das Vorhandensein einer Inversion in etwa 200 bis 300 m Höhe verhindert ein Absinken der Kraftwerksabgase [Sprinzl]. Dabei kommt es zu einer starken Verdünnung des transportierten Materiales. Ob sich ein Effekt am Boden nachweisen läßt ist fraglich, ohne Daten über die Grundbelastung der Region lassen sich hierzu keine weiteren Aussagen machen.

Um die Mittagszeit hebt sich die bodennahe Inversionsschicht durch die Einstrahlung der Sonne. Nach einer windstillen Phase, bei der es zu einer Speicherung der Emissionen über dem unmittelbaren Emissionsgebiet kommen kann, setzt am Nachmittag Talaufwind ein. Aus diesem Grund konnten an den Prallhängen im Westen und Südwesten von Voitsberg vor Inbetriebnahme der Naßentschwefelungsanlage hohe Konzentrationen von SO₂ festgestellt werden.

Für die Abschätzung des Einflußbereiches des Kraftwerkes auf das Umweltkompartiment "Atmosphäre" und im weiteren auf das Kompartiment "Pedo-/Lithosphäre" wurde die ÖNORM M9440 herangezogen. Dabei wurde die Schadstoffbelastung der Luft am Boden (z=0) für einen SO₂-Ausstoß von 200 kg/h mit folgenden Formeln berechnet.

$$S_i(x, y, z) = \frac{Q \cdot 10^3}{3,6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \bar{u} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{(z-H_e)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H_e)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) \right\} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right) \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{Q \cdot 10^3}{3,6 \cdot \pi \cdot \bar{u} \cdot A \cdot B} \cdot \left(\frac{0,6065 \cdot A \cdot \sqrt{r}}{H_e}\right)^r \quad (2) \quad x_{\max} = \bar{u} \cdot [H_e / (A \cdot \sqrt{r})]^{1/\alpha} \quad (3)$$

$$r = \frac{\alpha + \beta}{\alpha} \quad \bar{u} = \frac{u_a}{m+1} \cdot \left(\frac{2 \cdot H_e}{a}\right)^m \quad \text{mit } H_e = H + \Delta H \quad (4)$$

$$\Delta H_1 = 2,6 \cdot \frac{\sqrt{M}}{u_H} ; \quad \Delta H_2 = 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{M}{u_H \cdot s}} \quad \text{für } \Delta H \text{ ist der kleinere der beiden Werte zu nehmen}$$

mit $M = 36 \cdot 10^{-5} \cdot V \cdot (T - T_L)$ und $u_H = u_a \cdot \left(\frac{H}{a}\right)^m$

Erklärung der Variablen und Formelzeichen

Q	Massenstrom des luftverunreinigenden Stoffes	200	kg/h
\bar{u}	mittlere Windgeschwindigkeit		m/s
σ_y	Streuungsparameter		m
σ_z	Streuungsparameter		m
H	Schornsteinhöhe	180	m
ΔH	Schornsteinüberhöhung		m
H_e	effektive Quellhöhe		m
A	dimensionsbehaftete Konstante zur Bestimmung		
B	der Streuungsparameter		
α	Exponenten zur Bestimmung		
β	der Streuungsparameter		
m	Exponent zur Berechnung des Windgeschwindigkeitsprofils		
s	Stabilitätsparameter		s ⁻²
M	Rechengröße zur Bestimmung des Abgasauftriebes		kJ/s
V	Abgasvolumenstrom, vor Abzug des Wasserdampfes	1.250.000	Nm ³ /h
T	Temperatur des Abgases an der Schornsteinmündung	80	°C
T_L	Temperatur der Außenluft	0	°C
u_H	Windgeschwindigkeit in Schornsteinhöhe		m/s
u_a	Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe		m/s
a	Anemometerhöhe	40	m
S(x,y,z)	berechnete Konzentration des Schadstoffes		mg/m ³
S_{\max}	maximale Schadstoffkonzentration im Punkt x_{\max}		mg/m ³
x_{\max}	Punkt der maximalen Schadstoffkonzentration		m

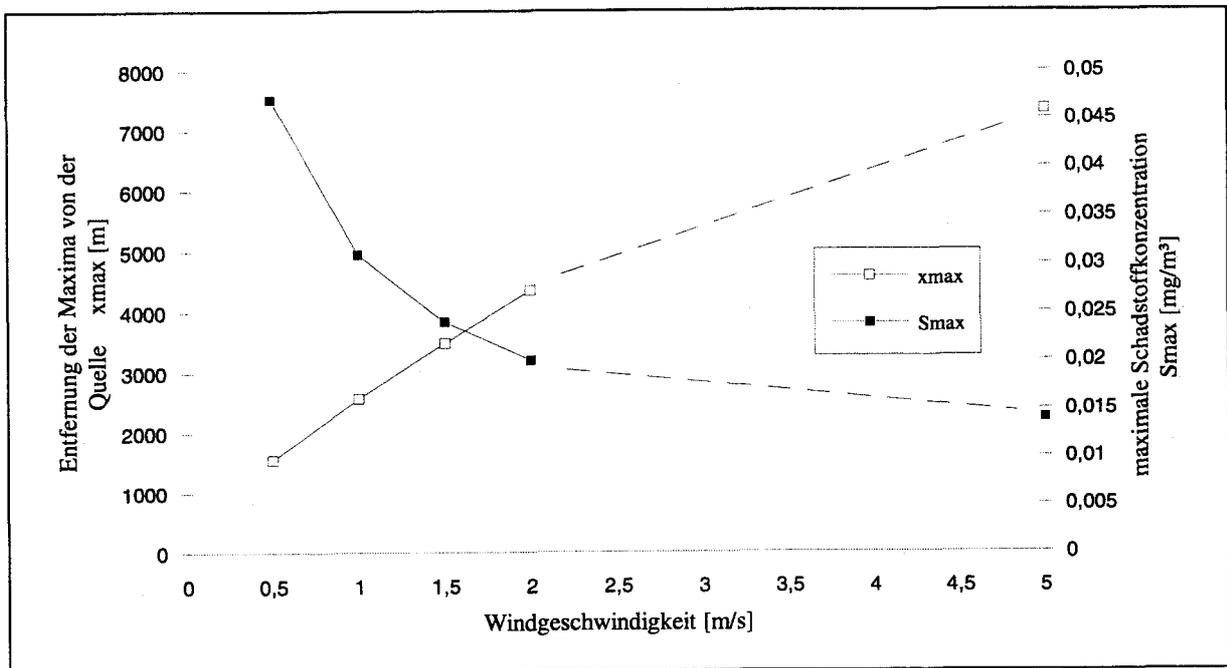
Diese Berechnung gilt für normale Ausbreitung und berücksichtigt die im Raume Voitsberg häufig auftretenden Inversionswetterlagen nicht. Jedoch besagt die oben angeführte Norm, daß auch bei ungünstigster Inversionssituation die doppelte maximale Schadstoffkonzentration (S_{\max}) nirgends überschritten wird.

Im folgenden sind Berechnungen (Ausbreitungsklasse "neutral") für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten, gemessen in 40 m Höhe dargestellt [Struwe & Sprinzl 1980/81]. Auch aus anderen Arbeiten geht die für die Region charakteristische geringe Windgeschwindigkeit hervor [Moschitz 1986, Sprinzl 1987]. Zur Abschätzung der Einflußgröße der Windgeschwindigkeit wurde auch eine Berechnung mit 5 m/s durchgeführt (s.a. Abb.23).

Tab.19: Abhängigkeit der Maxima von der Windgeschwindigkeit (Formel (2) und (3))

u_a [m/s]	S_{\max} [mg/m ³]	x_{\max} [m]
0,5	$4,7 \cdot 10^{-2}$	1555
1	$3,1 \cdot 10^{-2}$	2575
1,5	$2,4 \cdot 10^{-2}$	3495
2	$2,0 \cdot 10^{-2}$	4357
5	$1,4 \cdot 10^{-2}$	7349

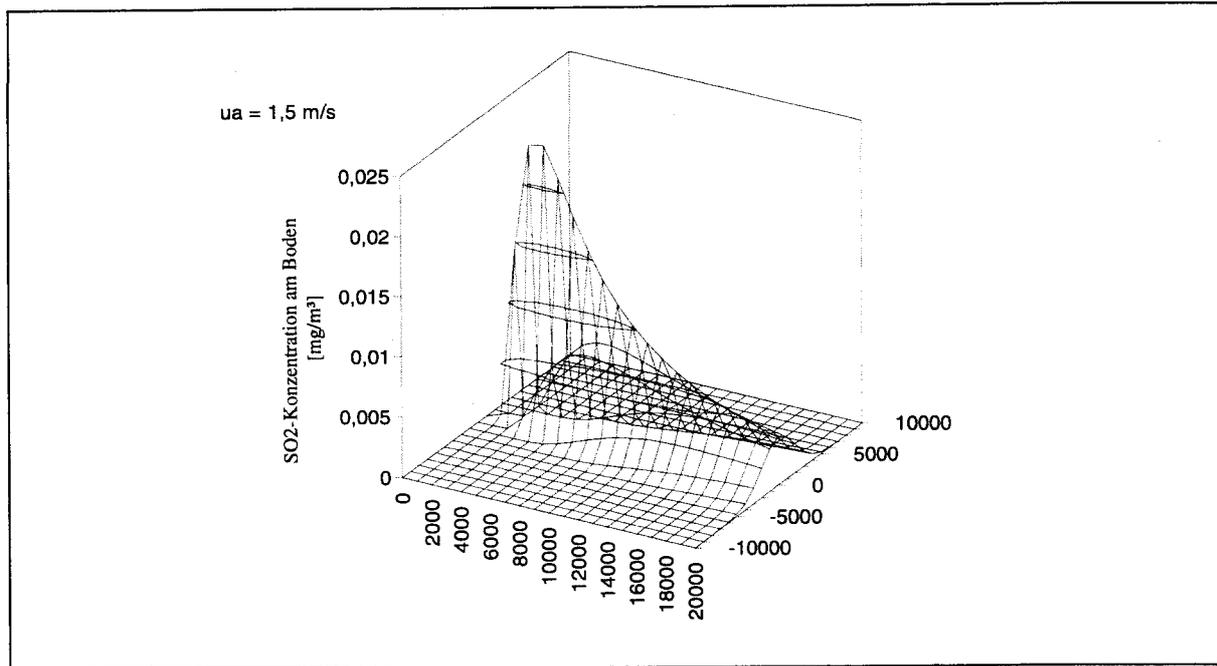
Abb.18: Abhängigkeit der Maxima von der Windgeschwindigkeit



Die Entfernungen der Maxima (x_{\max}) liegen für höhere Windgeschwindigkeiten (> 2 m/s) im Bereich der von Sprinzi [Sprinzi 1987] gemessenen.

In Abb.20 ist die bodennahe Schadstoffverbreitung für $u_a = 1,5$ m/s dargestellt. Formel (1) ist laut Norm nur für den Bereich bis $x = 15.000$ m anzuwenden. Darüber hinaus wirken sich Prozesse wie Auswaschung, Ablagerung und Umwandlung verstärkt aus. Für deren Miteinbeziehung in die Ausbreitungsrechnung gibt es zurzeit noch keine praxistauglichen Modelle [Ullmann].

Abb.19: berechnete SO₂-Konzentration am Boden



Grenzwert

Tab.20: Immissionsgrenzwerte für SO₂

Österreichische Luftqualitätskriterien (Akademie der Wissenschaften)			
Vegetationsschutz:	April - Okt.	HMW	70 µg/m ³
		TMW	50 µg/m ³
	Nov. - März	HMW	150 µg/m ³
		TMW	100 µg/m ³
Gesundheitsschutz:		HMW	200 µg/m ³ *
		TMW	200 µg/m ³
* darf 3x pro Tag jedoch nur 500 µg/m ³ betragen			
HMW	Halbstundenmittelwert	TMW	Tagesmittelwert

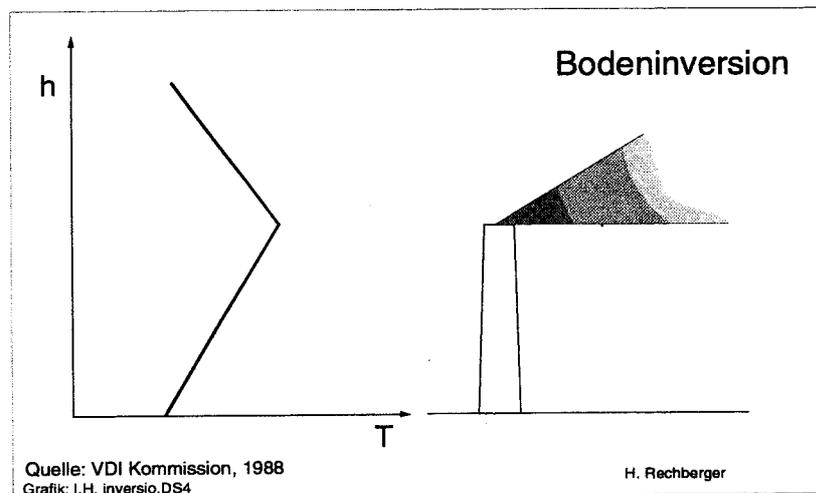
Im Sinne einer "worst case"- Abschätzung wurde der niedrigste empfohlene Tagesmittelwert von 50 µg/m³ für die Vegetationsperiode April bis Oktober als Orientierungshilfe für die Ziehung der Regionsgrenzen herangezogen, da das Kraftwerk auch in

diesem Zeitraum fallweise in Betrieb sein kann. Nach der VDI-Kommission zur Reinhaltung der Luft [Stadtklima und Luftreinhaltung 1987] beträgt die mittlere SO_2 -Belastung ländlicher Gebiete $7 - 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dieser Literaturwert dient als Referenzgröße für die Hintergrund- bzw. Vorbelastung der Luft. Nimmt man als Abgrenzungskriterium für die auf SO_2 bezogene "atmosphärische Region" einen Schwellenwert von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an, so ist dies der Bereich ab dem das Kraftwerk nicht mehr entscheidend zur Gesamtbelastung beiträgt, da selbst bei hoher Vorbelastung ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) der Grenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht überschritten wird.

Zusammenfassend und stark vereinfachend können nach derzeitigem Wissensstand (Machbarkeitsstudie) folgende Immissionssituationen für die Region um das Kraftwerk auftreten:

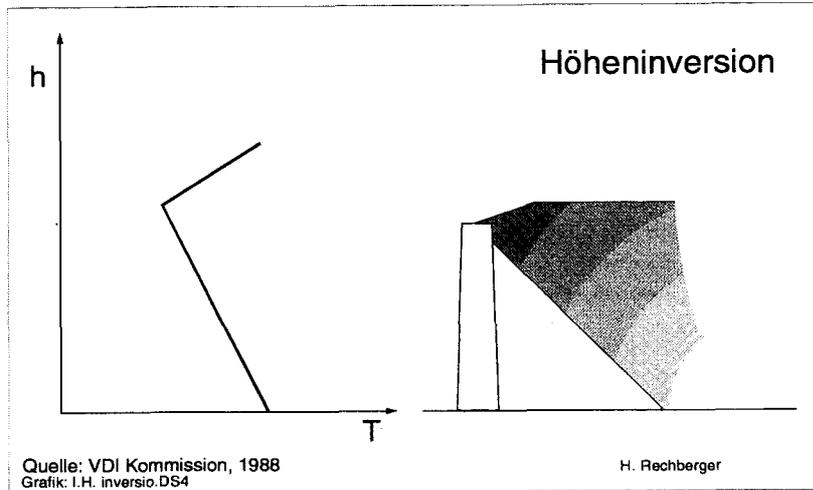
Bodeninversion: Die Emissionen des Kraftwerkes durchstoßen dabei die bodennahe Inversionsschicht und werden durch diese am Absinken gehindert. Dadurch kommt es zu einer starken Verdünnung der über dieser Schicht weitertransportierten Schadstofffracht. Emissionen von Emittenten, die die Inversionsschicht nicht durchstoßen, können durch den stark begrenzten Raum unterhalb der Schicht ein Problem darstellen.

Abb.20: Emissionssituation bei Bodeninversion



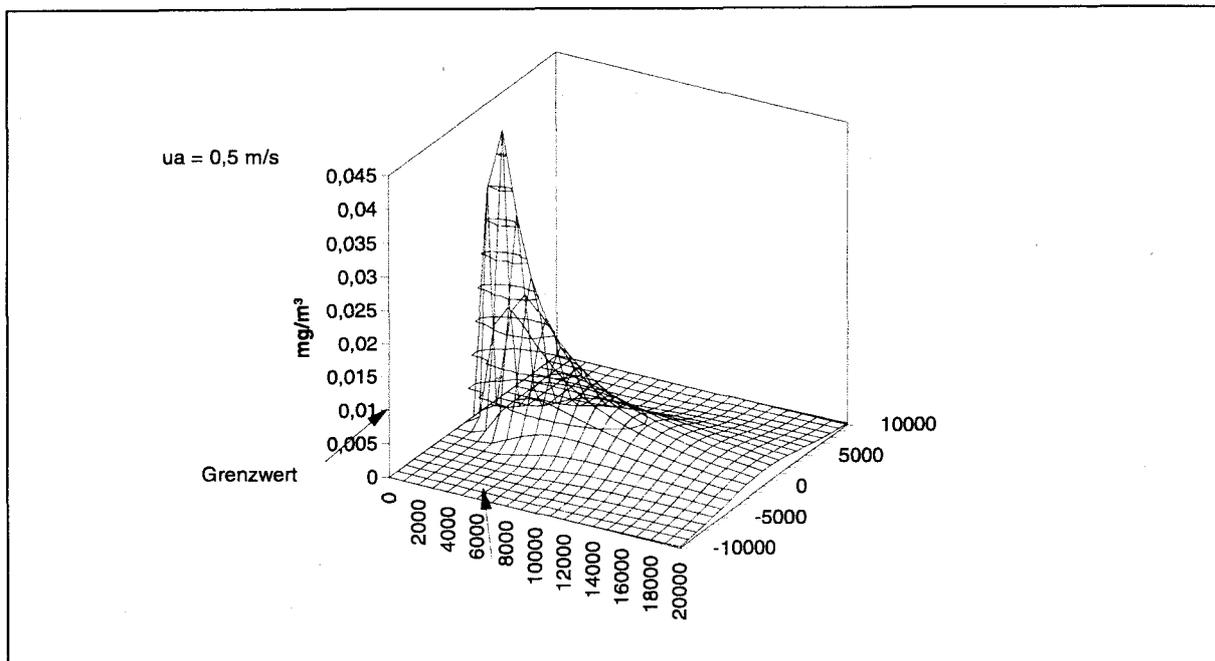
Höheninversion: Die Emissionen des Kraftwerkes durchstoßen die höherliegende Inversionsschicht nicht mehr und werden so am vertikalen Aufstieg gehindert. Für diese Wetterlage könnten vor allem an Prallhängen erhöhte Konzentrationen auftreten. Ob diese über oder unter den oben erwähnten $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen kann hier nicht sicher gesagt werden. Ein Vorteil dieser Wettersituation ist, daß Schadstoffe, die über der Inversionsschicht in die Region importiert werden am niedersinken gehindert werden.

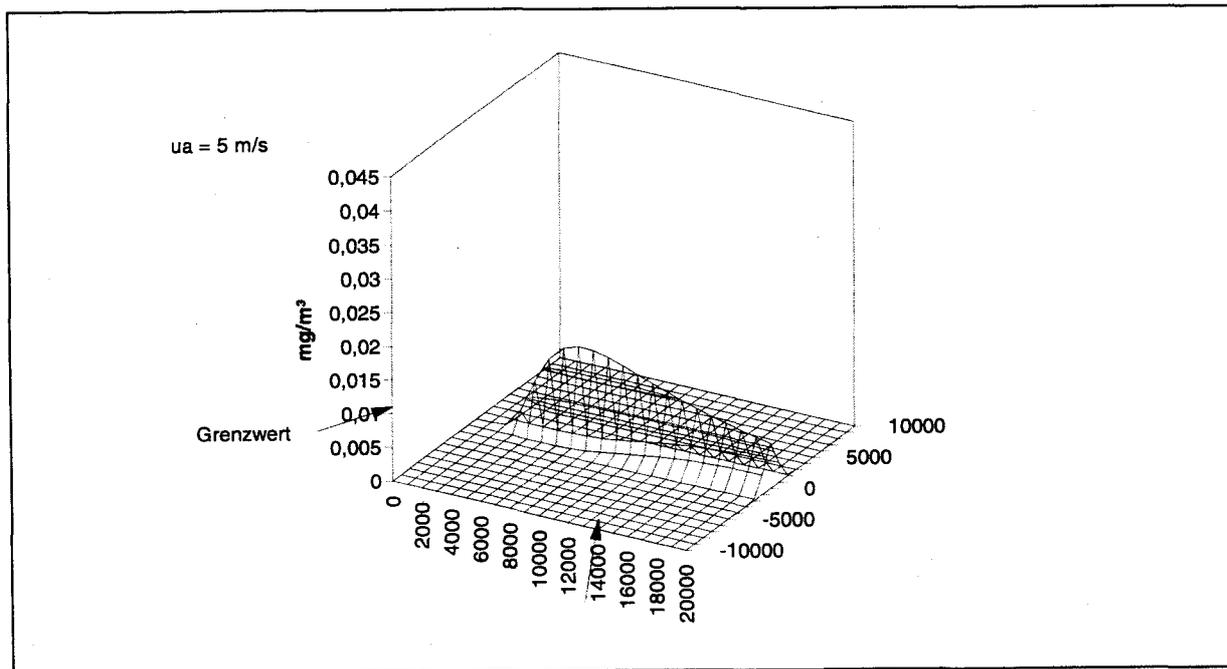
Abb.21: Emissionssituation bei Höheninversion



Normale Ausbreitung: Bei strengster Auslegung (Schwellenwert von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) kommt man, je nach Windgeschwindigkeit (u_a), auf einen Radius von 7 bis 14 km.

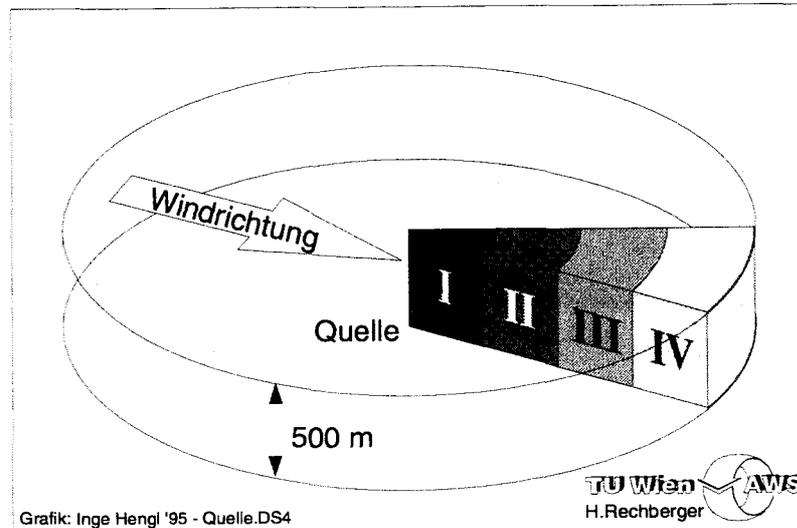
Abb.22: Ungestörte Ausbreitung (Gaußmodell)





Abschätzung für Höheninversion

Um auch Aussagen über die durch das Gauß-Modell nicht darstellbaren Belastungen der im Westen liegenden Gemeinden machen zu können, wurden im folgenden die Konzentration in den konzentrischen Ringsegmenten um die Punktquelle Kraftwerk unter der Annahme, daß jedes Segment 200 kg aufnimmt, berechnet. Dabei wird weiters angenommen, daß sich der Schadstoff (SO_2) in einem Sektor mit 30° Öffnungswinkel und einer Höhe von 500 m (Untergrenze der Inversion) völlig gleichmäßig im jeweiligen Segment verteilt (totale Reflexion an Boden und Inversionsuntergrenze). Dies trifft in einer Entfernung von einigen Kilometern von der Punktquelle relativ gut zu, da es bis dahin auch bei kleinen Windgeschwindigkeiten und Turbulenzen zu einer guten Durchmischung gekommen ist. Die Windgeschwindigkeit beträgt 1 m/s. Dies bedeutet, daß die Luft in 1 Stunden 3,6 km weit transportiert wird. Die Höhe der Inversionsschicht wurde so gewählt, daß die Kraftwerksemissionen diese nicht mehr durchstoßen können ($H_e = 355 \text{ m}$ Formel (4)).

Abb.23: Skizze zur Abschätzung der SO₂-Konzentration bei Höheninversion

	I	II	III	IV
Entfernung von der Quelle [km]	0-3,6	3,6-7,2	7,2-10,8	10,8-14,4
SO ₂ -Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	120	40	24	17

Da Prallhänge bereits in einigen Kilometern Entfernung (Sektor II) von der Quelle liegen, können lokale Überschreitungen des Schwellenwertes von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht ausgeschlossen werden.

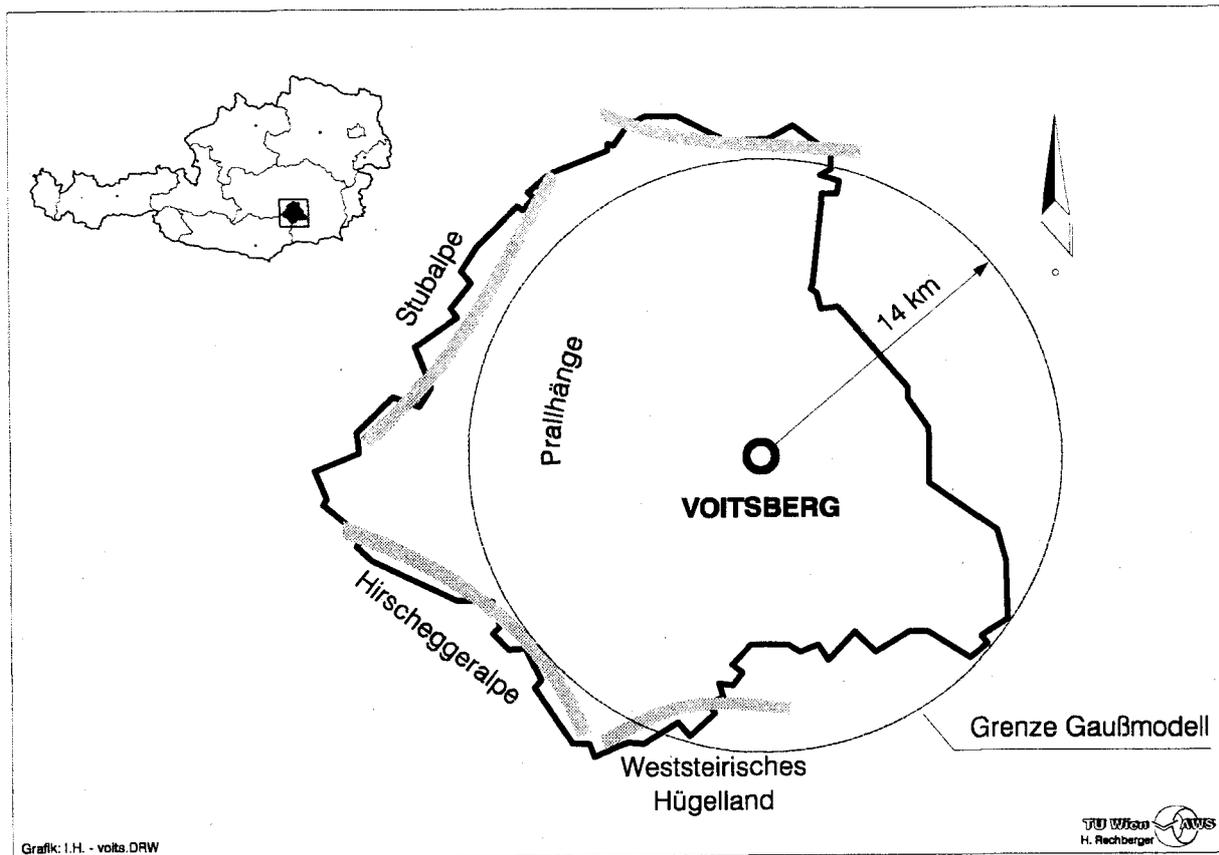
Die Brauchbarkeit all dieser mehr oder weniger einfachen Modelle kann mit Messungen aus umliegenden Luftgütemeßstellen (Köflach, Krems bei Voitsberg, Piber, Voitsberg) überprüft werden. Aus ihnen läßt sich auch auf die Hintergrundbelastung der Region, die für die Fragestellung "Einfluß des Kraftwerkes auf die Region" wichtig ist, schließen.

Die stoffbezogene Region für SO₂ läßt sich mit dem auf dem derzeit vorhandenem Datenmaterial basierenden Wissen nach Westen geografisch mit dem Anstieg zur Stubalpe und Hirscheggeralpe abgrenzen. Offen bleibt dabei noch die Frage nach der Immissionskonzentration bei Inversionswetterlage für die Prallhänge der dort befindlichen Gemeinden (Köflach, Maria Lankowitz, Graden, Piberegg und eventuell andere). Die größte Belastung tritt dabei bis zur Untergrenze der Inversionsschicht auf (ca. 700 m). Zu bemerken ist noch, daß bei Höheninversion die Kraftwerksabgase am Boden gehalten werden, fremde überregionale Emissionen aber am Absinken gehindert werden.

Richtung Osten läßt sich die Region mit dem oben vorgestellten Gauß-Modell recht gut abgrenzen. Auch bei extremster Annahme ($2 \cdot S_{\text{max}}$, s.o.) bleiben die Immissionswerte unter dem von der Akademie der Wissenschaften empfohlenen Grenzwert von

50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nimmt man als äußerst strenges Begrenzungskriterium einen Wert von nur 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, so ergibt sich bei ungestörter Ausbreitung je nach Windgeschwindigkeit eine Reichweite von 7 bis 14 km. Bei Bodeninversion können die vom Kraftwerk emittierten Schadstoffe infolge des gestörten vertikalen Austausches nicht zum Boden gelangen, es kommt zu einer starken Verdünnung über der Inversionschicht.

Abb.24: Darstellung der "stoffbezogenen" Region für SO_2

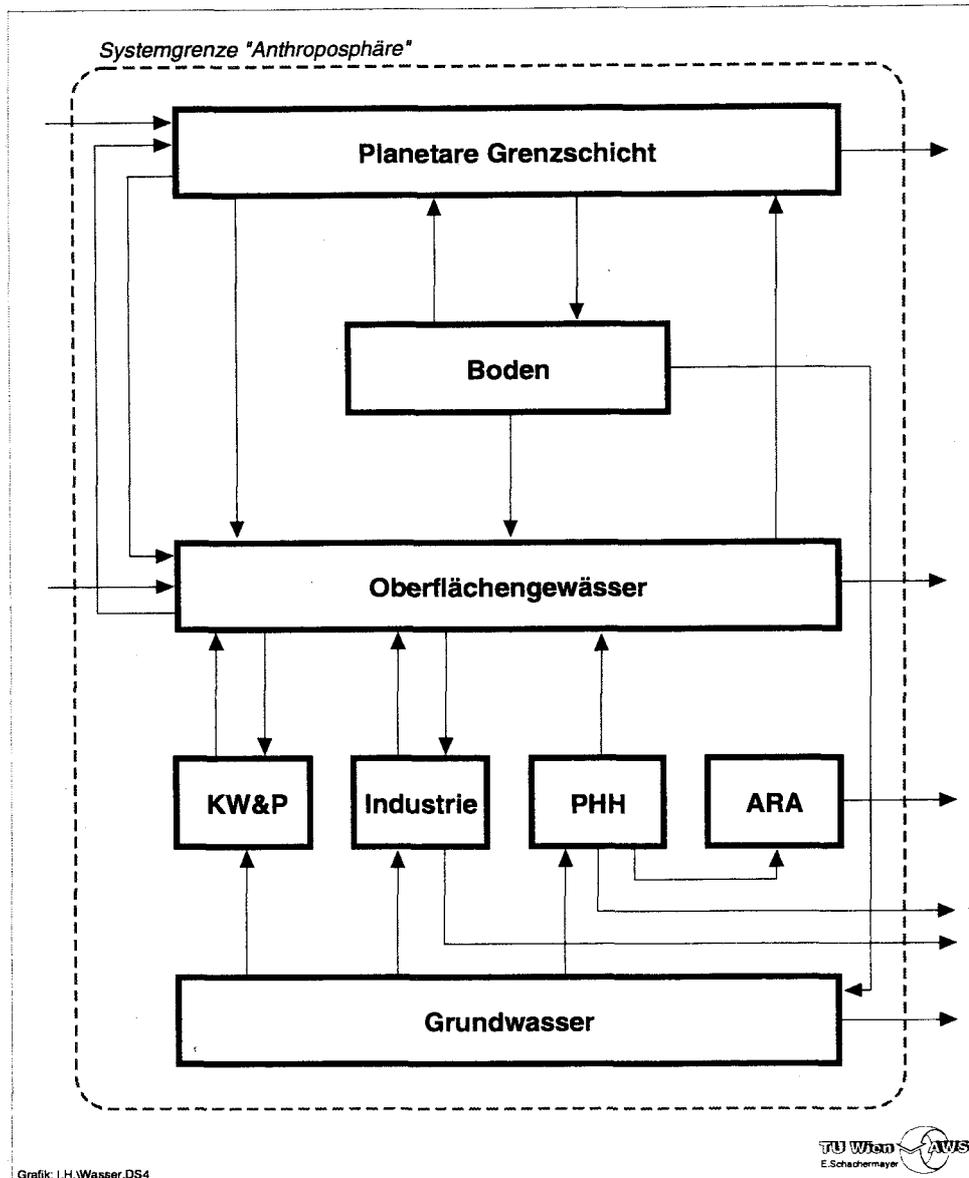


⇒ In einem weiterführenden Projekt sollen auch Ausbreitung von Stäuben und Inversionen anhand der ÖNORM berechnet werden.

6.6 Darstellung der "hydrologischen Region"

Um den Beitrag des Kraftwerkes zu den Massen- und Stoffflüssen der umgebenden hydrologischen Region zu untersuchen, soll von folgender Darstellung ausgegangen werden.

Abb.25: Darstellung der hydrologischen Region



Die Region wird im wesentlichen durch den (die) Vorfluter des Kraftwerkes bestimmt, wobei die Grenze einerseits mit dem Beginn des anthropogenen Einflusses auf das Oberflächengewässer und andererseits nach der Einleitung der Kraftwerksabwässer in den Vorfluter gezogen wird. Dadurch können die Anteile der Prozesse "Industrie", "Kraftwerk und Peripherie" und "Privater Haushalt" (PHH) getrennt beurteilt werden. Die Größe der Kompartimente "Boden" und "Planetare Grenzschicht" ist geeignet, im Sinne einer Massenbilanz, anzunehmen.

7. Vorgehen zur Erstellung einer Stoffflußstudie auf der Grundlage der Machbarkeitsstudie (weiteres Vorgehen)

Prinzipiell wird die Stoffflußstudie nach der in Kapitel 5 vorgestellten Methode durchgeführt. Dazu müssen noch die folgenden, durch diese Machbarkeitsstudie aufgeworfenen Fragen bzw. Informationsdefizite geklärt werden.

Offene Problempunkte bei Kraftwerk und Bergbau

Die bisher geleistete Arbeit hat gezeigt, daß vor allem für die Systeme Bergbau und Kraftwerk noch Datenmaterial benötigt wird. Wie in Kapitel 5 ausgeführt wird, ist das geeignete Vorgehen zur Verknüpfung der Subsysteme Bergbau, Kraftwerk und Aschenkippe die Darstellung der Güter- und Energieflüsse in Zeitreihen. So können alle Flüsse über lange Zeiträume gemittelt werden. Nur dieser Ansatz erlaubt es den zeitlich diskontinuierlichen Prozeß Kraftwerk mit seiner Peripherie und im weiteren mit seiner Umgebung sinnvoll zu verknüpfen. Die Erhebung dieser Daten bedeutet sicherlich einigen Aufwand, grundsätzlich sollte sie aber möglich sein.

Für den Bergbau sind vor allem noch Energiedaten von den Anfangsjahren zu erheben, um ein vollständiges Bild zu erhalten. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um den Gesamtstrom- und Treibstoffverbrauch des Tagbaues Oberdorf. Weiters sollten Rekultivierungsmaßnahmen abgeschätzt werden. In wie weit der Aufwand für bereits getätigte Rekultivierungsmaßnahmen in diesen Daten bereits enthalten ist bleibt noch abzuklären.

Für das Kraftwerk fehlen Daten über die eingesetzte Menge an Verbrennungsluft; die angegebenen Werte bezüglich Feuchtigkeit und auch der Sauerstoffüberschuß im Rauchgas konnten rechnerisch nicht ganz nachvollzogen werden. Für die in Kapitel 5 ausgewählten Güterflüsse (Kohle, Kalk, Wasser, Aschen, Gips, Abwasser und Reingas) sollten noch Zeitreihen, sofern sie nicht zur Verfügung standen, ermittelt werden. Desgleichen gilt für die Schadstoffe CO , NO_x , SO_2 , NH_3 , CO_2 und Staub. Weiters ist der Überlauf aus dem Naßentschlacker, für den bisher keine Daten existieren zu untersuchen.

Erstellung eines Probenplanes

Die Erstellung eines Probenplanes für das Gut Kohle erfordert genaue Kenntnisse bezüglich der Inhomogenität des Probanden. Die erforderliche Probenmenge ist eine Funktion der Inhomogenität des Gutes. Große Streuung der Schwermetallkonzentrationen würde eine große Probenmenge erforderlich machen um für die Gesamtheit repräsentativ zu sein. Der Analyseaufwand richtet sich nach den Möglichkeiten diese Probenmenge zu homogenisieren und damit einen physikalischen Mittelungseffekt zu

erzielen. Die optimale Probenentnahme kann mit Hilfe von Literaturdaten [Wills 1992, Taggart 1953] und eventuell einigen Vorversuchen bestimmt werden. Weiters müssen die Probenentnahmen der anderen zu untersuchenden Güterflüsse (Aschen, Gips, Kalk, Reingasstaub und Reingas) zeitlich und mengenmäßig mit der Beprobung der Kohle abgestimmt werden, wobei sich für einzelnen Güter, aufgrund ihrer Homogenität oder ihres unbedeutenden Beitrages zur Bilanz eines Stoffes, eine durchaus geringere Probenanzahl ergeben kann. Sollten sich, was durchaus zu erwarten ist, nur lastabhängige Transferkoeffizienten ergeben, könnte auf die Beprobung der Outputströme verzichtet werden und nur mehr die Kohle in Abhängigkeit von den oben erwähnten Kriterien einer Analyse bedürfen. Ob sich Schwermetallgehalte mit Daten wie Heizwert oder Aschegehalt verknüpfen lassen, wäre ein weiterer interessanter Aspekt einer solchen Untersuchung.

Für die Beprobung der Kohle wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen: Um einen Probeplan zu entwickeln, der die gewünschte Sicherheit der Ergebnisse gewährleistet, muß zunächst ein Vorversuch durchgeführt werden, um die Streuung der einzelnen untersuchten Elemente in den Proben zu bestimmen. Zu diesem Zweck würden aus dem Kohlenlager des Kraftwerkes an verschiedenen Stellen einige Chargen, deren Masse aus Literaturdaten abgeschätzt werden muß, gezogen, und diese analysiert werden. Als grobe erste Abschätzung für die notwendige Probenanzahl, die für einen Vorversuch gezogen werden müßte, kann auf die Erfahrung des Institutes bei der Beprobung der Produkte einer Müllverbrennungsanlage zurückgegriffen werden. Auch dort wurde in einem Vorversuch die Streuung der zu untersuchenden Elemente in den einzelnen Gütern bestimmt. Es zeigte sich, daß auf der Basis von 36 analysierten Proben der Müllverbrennungsschlacke, die in diesem System das inhomogenste Produkt darstellt, und 24 untersuchten Proben des homogenen Filterstaubs ausreichende Kenntnisse hinsichtlich der Streuung der einzelnen Elemente in diesen Produkten gewonnen werden konnten, um darauf aufbauend einen Probeplan zu entwickeln. Unter der Annahme, daß sowohl die Input- als auch die Outputgüter des Kraftwerkes relativ homogen sind, wird für eine erste Kostenabschätzung der Probennahme für einen Vorversuch eine Probenanzahl von 20 Proben pro Gut angenommen. Für die Analysen der Feststoffe Kohle, Aschen, Gips, Kalk und Reingasstaub ergäben sich somit 100 Proben. Diese Zahl kann auf Grund der oben angeführten Überlegungen auch geringer sein.

Etwaige bereits existierende Arbeiten (Dissertationen, Publikationen, betriebsinterne Daten) können den Meßaufwand natürlich reduzieren.

Offene Probleme Region

Für die Darstellung der Region sollen Daten nach folgender Priorität herangezogen werden:

Die Daten sollen regionsspezifisch sein. Ist dies nicht möglich, sollen überregional verfügbare (Steiermark, Österreich) Daten herangezogen und auf die jeweilige Region (je nach Definition der Systemgrenzen) umgerechnet werden. Ist auch diese Vorgangsweise nicht möglich, muß auf andere Literatur zurückgegriffen werden, wobei es von Fall zu Fall abzuschätzen gilt, inwieweit solche Daten für den speziell betrachteten Fall Gültigkeit haben. Auf welche Daten nun für die jeweilige Betrachtung zurückgegriffen werden muß, kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht gesagt werden.

Ausdrücklich sei an dieser Stelle betont, daß die Einbettung des Kraftwerkes in die Region nur unter Anwendung des oben genannten Datenmaterials erfolgen soll. Die Erhebung dieser Daten erfolgt durch die Ersteller der Studie. Außer zur Darstellung der Stoffflüsse durch das Kraftwerk sind keine Meßprogramme sinnvoll. Die analytische Durchleuchtung des Kraftwerkes ist allerdings unbedingt notwendig. Unsicherheiten in der Relation der Stoffflüsse von Kraftwerk und Region dürfen nur auf Seiten der Region liegen, sollen die Ergebnisse der Arbeit dem Unternehmen als Grundlage einer offensiven Umweltpolitik dienen.

8. Beantwortung der Fragen im Sinne einer Zusammenfassung

In der Folge wird aufgezeigt, welche der in Kapitel 3 gestellten Fragen beantwortet werden konnten, und welche noch offen sind.

Die **Frage 1** (*Welches sind die wichtigsten Güter, Prozesse und Stoffe, die für eine Systemanalyse des Kraftwerkes und des Kohleabbaus in Hinblick auf langfristige regionale Umweltverträglichkeit und optimale Ressourcennutzung berücksichtigt werden müssen? Welche Indikatoren sind auszuwählen, um Fragen der Energiebilanz, der Massen- bzw. Stoffbilanz und der Volumenbilanz zu beantworten?*) ist hinsichtlich der wichtigsten Güter, Prozesse und Stoffe durch die Erstellung der Systemanalysen für Kraftwerk und Bergbau bereits beantwortet. Eine genaue Auflistung der Prozesse, Güter und Stoffe findet sich in Kapitel 5. Die zu bilanzierenden Elemente werden einerseits durch die Elementaranalyse der Braunkohle und andererseits durch die signifikanten Massenströme durch die betrachteten Systeme festgelegt. Eine erste Abschätzung hinsichtlich der Relevanz dieser Auswahl auf die langfristige regionale Umweltverträglichkeit des Kraftwerkes mit Peripherie wurde in Kapitel 6.4 vorgenommen. Es zeigte sich, daß bezüglich der vom Kraftwerk verursachten Immissionen

vor allem die Selen- und Quecksilberwerte einer eingehenderen Untersuchung bedürfen. Die Daten, auf denen diese Abschätzung basiert, entstammen nur zwei Kohleanalysen und sind deshalb nur als grobe Abschätzung zu betrachten. Für ein weiteres Vorgehen muß die Datengrundlage hinsichtlich der Braunkohlezusammensetzung unbedingt verbessert werden. Weiterhin wurde dargestellt, daß die im Karlschacht 2 verkippte Asche ein beträchtliches anthropogenes Lager an Schwermetallen darstellt. Im Vergleich zur Zusammensetzung der Erdkruste ergibt sich in den Aschen eine signifikante Anreicherung bei den Elementen Arsen, Selen und Quecksilber; inwieweit diese Elemente durch chemisch-physikalische Prozesse aus ihren Verbindungen mobilisierbar sind muß abgeklärt werden.

Auch **Frage 2** (*Wie muß das System räumlich und zeitlich begrenzt werden?*) konnte bereits größtenteils beantwortet werden. Während die räumlichen Grenzen für die Systeme "Bergbau" und "Kraftwerk" mit den geographischen Grenzen des Tagebaues Oberdorf bzw. dem Werksgelände des Kraftwerkes übereinstimmen, mußten für die Bestimmung der zeitlichen Grenzen einige methodische Probleme gelöst werden. So wird für den Bergbau der gesamte Zeitraum vom Beginn der Förderung im Tagebau Oberdorf bis zum heutigen Zeitpunkt betrachtet, während für das Kraftwerk zunächst eine Vollaststunde bilanziert wird. Ein nicht triviales Problem stellte dann das Zusammenfügen der einzelnen Teilsysteme zu einem einheitlichen, konsistenten und aussagekräftigen Gesamtsystem dar, welches Bergbau, Kraftwerk und Aschenkippe umfaßt. Wie in Kapitel 5 beschrieben, mußten die zeitlichen Systemgrenzen des Kraftwerkes für diesen Schritt modifiziert werden. Um dem in der Systemanalyse "Kohlebergbau" definierten mittleren Förderjahr zu entsprechen, wurden für das Kraftwerk die zur Verfügung stehenden Betriebsdaten über einen längeren Zeitraum gemittelt. Auf Grund dieser Mittelung wurde als zeitliche Systemgrenze ein Normalbetriebsjahr von 4.000 Betriebsstunden definiert, welches auf statistischer Ebene die typischen, auch in der Realität vorkommenden Betriebszustände widerspiegelt.

In Kapitel 6 wird auf die Frage nach der Auswahl der geeigneten Regionsgrenzen in Abhängigkeit von dem jeweils betrachteten Gut bzw. Stoff eingegangen. Es werden ein produktbezogener und ein stoffbezogener Ansatz beschrieben. Im produktbezogenen Ansatz wurde für die Definition der Region das Produkt "Strom" des Kraftwerkes herangezogen. Dieser Ansatz geht davon aus, daß in Hinblick auf das Produkt "Strom" die Lokalisierung der räumlichen Systemgrenzen als geographische Grenzen eines Gebietes nicht naheliegend ist. Dieser Regionsbegriff spiegelt denjenigen Anteil am statistischen Durchschnitt Österreichs wieder, der ausschließlich durch das Kraftwerk mit Strom versorgt werden kann. Als Systemgrenzen der "stoffbezogenen" Region soll die Einwirkungsreichweite von "Kraftwerk & Peripherie" auf die Umweltkompartimente Boden, Wasser und Luft herangezogen werden.

Hinsichtlich der Deponierung der Aschen besteht noch Unsicherheit über den Wasserhaushalt der Aschenkippe. Was passiert mit dem Niederschlagswasser? Entsteht langfristig Sickerwasser oder nicht? Diese Fragen müßten in einem Folgeprojekt abgeklärt werden, um Aussagen über einen längeren Betrachtungszeitraum, der bezüglich der Aschenkippe zweifellos notwendig ist, machen zu können.

Frage 3 (*Wie sieht eine erste quantitative Abschätzung ausgewählter Güter- und Stoffbilanzen des Kraftwerkes einschließlich der Kohlegewinnung aus? Welche Folgerungen in Bezug auf Stärken und Schwächen des Systems lassen sich daraus ableiten?*) wurde mit der Erstellung der Güterbilanzen und erster pauschaler Stoffbilanzen in den Kapiteln 4.1.2 bis 4.2.3. beantwortet. Es zeigte sich, daß die Rauchgasreinigung des Kraftwerkes bezüglich Schwefel, Stickoxiden und den meisten Spurenelementen der Kohle sehr effektiv ist; für Quecksilber, Selen und Cadmium ergeben sich allerdings relativ hohe Transferkoeffizienten in das Reingas (s. Kapitel 6.4, Tab.11). Wiederum muß darauf hingewiesen werden, daß auch diese Berechnungen auf nur zwei Kohleanalysen basieren und daher nur als grobe Abschätzung betrachtet werden können. Der hohe Kohlenstoffgehalt in der Grobasche und der bisher offenbar nicht genauer untersuchte Überlauf aus den Naßentschlacker könnten in Zukunft zum Problem werden. Bei letzterem sollten Abwasseranalysen schnell Auskunft darüber geben.

Die Antworten auf **Frage 4** (*Welche Kenntnisse sind notwendig über die Region?*) werden in Kapitel 6.3 diskutiert. Erfahrungsgemäß werden die massenmäßig relevanten *Güterströme* durch die Anthroposphäre einer Region durch eine Beschränkung auf Industrie, Gewerbe, Bauwirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und die privaten Haushalte sehr gut erfaßt. Eine nähere Betrachtung der Güterflüsse hinsichtlich ihrer *stofflichen* Zusammensetzung ist hauptsächlich für jene Güter- und Stoffflüsse interessant, an denen die Flüsse von "Kraftwerk & Peripherie" einen relevanten Anteil haben. Für diese Art der Bilanzierung, die nicht die Gesamtheit aller Güter durch die Region erfassen will und kann, muß die Güterliste stoffspezifisch erstellt werden. Dazu ist es zunächst einmal notwendig, einen groben qualitativen Überblick über das Produktspektrum der Region zu haben um dann die Auswahl der relevanten Güter durchzuführen. Aus zeitlichen Gründen war es bisher nur möglich, eine solche Auswahl bezüglich des Elementes Kohlenstoff darzustellen.

Die Beantwortung der **Frage 5** (*Wie sieht ein konkretes Untersuchungsprogramm aus für eine nachfolgende quantitative Stoff-, Energie- und Volumenbilanz des Kraftwerkes und ihre Einbettung in die Region? Welche Güter, Prozesse und Stoffe müssen wie und wo in welchem Rhythmus untersucht werden? Welches sind die Kosten für die Bilanzen? Wie können die beiden Systeme "Kraftwerk" und "Region" miteinander quantitativ bezüglich Umweltbelastung und Ressourcennutzung in Beziehung gesetzt werden?*) wird in Kapitel 7 diskutiert. Für nachfolgende quantitative Stoffbilanzen des Kraftwerkes müssen Untersuchungen der wichtigsten Input- und Outputgüter über längere Zeit-

räume vorgenommen werden, wobei das Hauptaugenmerk auf die Kohle zu legen ist. Ein vorläufiger Probenplan der einzelnen Güter befindet sich in Kapitel 7. Für eine konsistente Darstellung einer Energiebilanz des Systemes Bergbau wäre es notwendig, die für das Jahr 1993 erhobenen Daten auch für die vorangegangenen Jahre zu erheben, um das sich ändernde Abraum zu Kohle Verhältnis zu berücksichtigen.

Für die Darstellung der Regionen werden nur vorliegende Daten herangezogen; eigene Untersuchungen sollen nicht durchgeführt werden. Liegen keine regionsspezifischen Daten vor, so sollen überregional verfügbare Daten herangezogen werden und auf die jeweilige Region umgerechnet werden. Ist auch diese Vorgangsweise nicht möglich, muß auf Literaturdaten zurückgegriffen werden.

Die Kosten für die Bilanzen sollen nun grob abgeschätzt werden:

Sachbearbeitung (2 Mannjahre)	öS	1.000.000
Projektleitung (0,1 Mannjahre)	öS	75.000
Sekretariatskosten (Berichterstattung, EDV)	öS	50.000
Analysekosten	öS	300.000

Gesamtaufwand	öS	1.425.000

Frage 6 (*Wie können die Resultate für ein Öko-Audit und für ein betriebliches Abfallwirtschaftsgesetz verwendet werden?*)

Die Ziele der 1993 vom Rat der Europäischen Gemeinschaften beschlossenen Verordnung "über die freiwillige Beteiligung gewerblicher Unternehmen an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (= Öko-Audit-Verordnung) sind die kontinuierliche Verbesserung der umweltbezogenen Leistungen, die systematische und regelmäßige Bewertung dieser Leistungen und die Bereitstellung von Informationen über die betrieblichen Umweltleistungen und Umweltauswirkungen für die Öffentlichkeit. In den Vordergrund des Interesses werden dabei die Verbindung von betrieblicher Stoffflußanalyse und ökologisch ausgerichtetem Management gestellt. Zur Beantwortung von Frage 6 läßt sich sagen, daß das Unternehmen auf Grund dieser Arbeit über erste Ergebnisse hinsichtlich der Umweltauswirkungen des Kraftwerkes verfügt. Es geht aber aus den Ausführungen auch klar hervor, daß die Datenlage beispielsweise hinsichtlich Metallemissionen noch unzureichend ist.

9. Literaturverzeichnis

- Angenend, F.J.; Trondt, L. Schadstoffinput - Schadstoffoutput, Bilanzierung bei der Müllverbrennung am Beispiel des Müllheizkraftwerkes Essen - Karnap, *VGB Kraftwerkstechnik* 1/1990, 36 - 42
- Baccini, P.; Daxbeck, H.; Glenck, E.; Henseler, G.; METAPOLIS Güterumsatz und Stoffwechselprozesse in den Privathaushalten einer Stadt, Bericht 34A des Nationalen Forschungsprogrammes Stadt und Verkehr, Zürich 1993
- Baccini, P.; Brunner, P.H. *Metabolism of the Anthroposphere*, Springer Verlag, 1991
- Baehr, H.D.; *Thermodynamik*, Springer Verlag, 1989, 433
- Brunner, P.H.; Daxbeck, H.; Henseler, G.; Steiger von, B.; Beer, B. RESUB-Der regionale Stoffhaushalt im unteren Bünztal, Eidgen. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG); Dübendorf, Schweiz 1990
- Daxbeck, H.; Brunner, P.H. *Österreichische Wasserwirtschaft* 1993, 45, 90-96
- Die Wasser- und Abfallwirtschaft Österreichs 1993, Jahrbuch des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes - ÖWAV, Heft 95, 1994, 137
- Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, 1990, L 23
- Festschrift Kohlekraftwerk Voitsberg 3, Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft Juli/August 1984, 37. Jahrgang
- Gluskoter, H.J. *Advanced Chemical Series* 1975, 141, 1-22
- Gössler, F. *Braunkohle* 1984, 36/11, 368-378
- Jilek, W.; Schechtner, O.; Zelle, K. Energie- und Emissionsbericht 1991 für die Bundesländer und Österreich 1993, 81, Vertrieb: Verein Regionale Energie - Information
- Kahl, D. in: Immobilisation schadstoffhaltiger Materialien, Internationale Fachtagung Innsbruck-Igls, Dezember 1993, 99-101
- Kautz, K.; Pickhardt, W.; Riepe, W.; Schaaf, R.; Scholz, A; Zimmermeyer, G. *Glückauf Forschungsheft* 1984, 45, 228-237

- Kautz, K. *Fortschr. Miner.* 1984, 62, 51-72
- Kloke, A. Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden, in: Bodenschutz 2. Band, E. Schmidt Verlag
- Kuhn, J.K.; Fiene, F.L.; Cahill, R.A.; Gluskoter, H.J.; Shimp, N.F. Abundance of trace and minor elements in organic and mineral fractions of coal. NTIS Report 1980 EPA-600/7-80-003, PB 81-113961
- Lauber, W. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Österreich, 1993
- Lauber, W. Cadmium in Österreich, Umweltbelastung und Umweltschutz, 1993
- Maier, H.; Schöngrundner, W.; Much, K. *VGB Kraftwerkstechnik* 69 1989, 8, 824-828
- Maier, H. *Chemie im Kraftwerk* 1989, 52-58
- Mauschitz, G. Klimarelevante Emissionen von Methangas und Kohlendioxid aus der Bereitstellung fossiler Energieträger, Technische Universität Wien, Institut für Verfahrens-, Brennstoff- und Umwelttechnik, Abteilung Anlagentechnik, 1993, 104-105
- Moschitz, E. Die Entwicklung der Emissions- und Transmissionssituation um den Kraftwerkstandort Voitsberg in den Jahren 1979 bis 1985, Dipl.-Arbeit, Graz, 1986
- ÖSTAT, Energieaufkommen und -verwendung in der österreichischen Volkswirtschaft im Jahr 1990
- Reimann, D.O. Beihefte zu *Müll und Abfall*, 29, 12
- Schachermayer, E.; Bauer, G.; Ritter, E.; Brunner, P.H. Messungen der Güter- und Stoffbilanz einer Müllverbrennungsanlage, Technische Universität Wien, Institut für Abfallwirtschaft, 1994, 86
- Smith, R.D. *Prog. Energy Combustion Sci.* 1980, 6, 53-119
- Sprinzi, G. Untersuchungen von Immissionsverteilungen und ihrem zeitlichen Verhalten im Raum Köflach - Voitsberg bei winterlichen Inversionswetterlagen, Wien 1987
- Steurer, Anton Stoffstrombilanz Österreich 1988, Veröffentlichung des IFF - Soziale Ökologie, Wien 1992

Struwe, W.; Sprinzi, G. Messungen der SO₂-Verteilung im Raum Köflach-Voitsberg, Zwischenbericht: Heizperiode 1980/81

Taggart, A.F. Handbook of Mineral Dressing, Ores and Industrial Minerals, 5. Auflage, 1953, 19-12

Umweltsituation in Österreich, Umweltkontrollbericht - Teil A, 1993, 4, Umweltbundesamt Wien

Wills, B.A. Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Oxford 1992