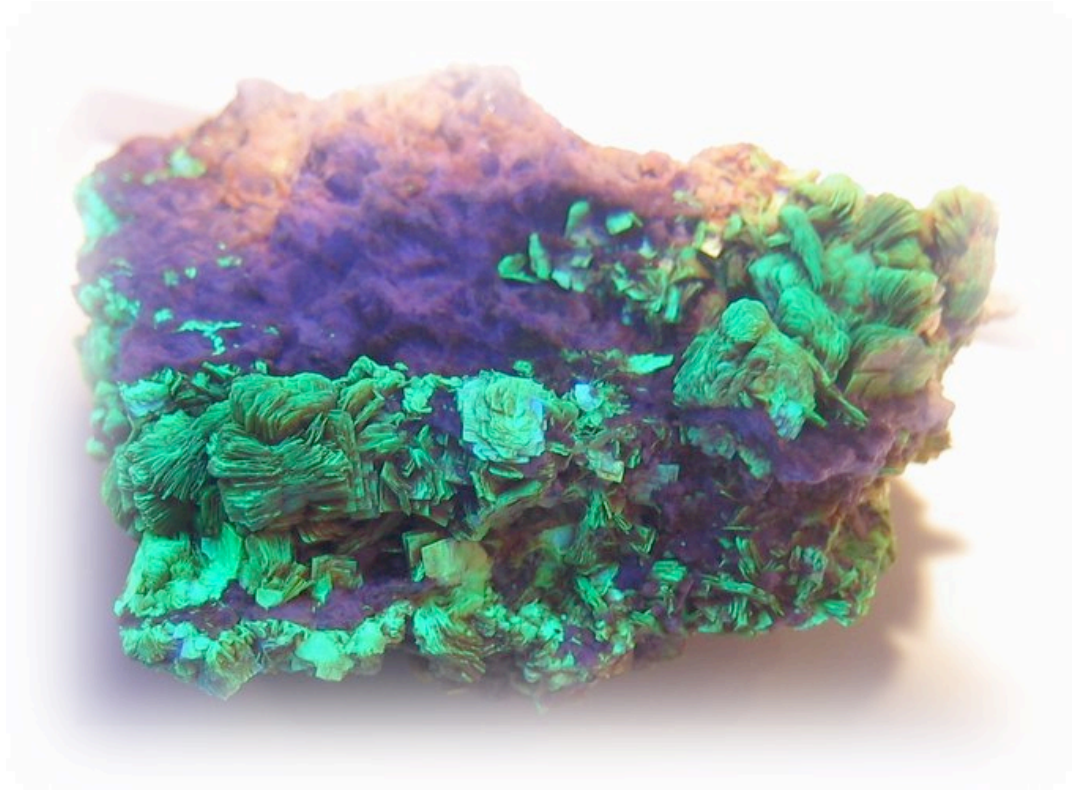


Unabhängiges Gutachten zur Energie- & CO₂-Bilanz von Nuklearenergie von Storm van Leeuwen



Auftraggeber

GREENPEACE

Greenpeace Schweiz

vertreten durch
Stephan Füglister
(Kampagnenforum GmbH)

Autor



Gabor Doka
Doka Ökobilanzen,
Zürich

Zürich, Dezember 2009

Korrigierte Fassung Juli 2010

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Zusammenfassung	4
3	Kostenäquivalenzabschätzungen vs. Prozessanalyse.....	5
4	Keine Klimabilanz	7
5	Klippen-Dynamik	8
6	Primärenergie.....	12
7	Energie oder Geld.....	15
8	Aufwendungen für Arbeitskräfte	16
9	Schlussfolgerungen	17
10	Quellennachweise	18

Autor: Gabor Doka, Doka Ökobilanzen, Zurich, do@doka.ch

Titelphoto: Barium Uranyl Phosphat, ein Uran-Mineral unter UV-Licht. Die Verfügbarkeit von Uranerzen bestimmt wesentlich die Resultate für künftige Kernenergie in der begutachteten Studie.

Quelle: <http://www.flickr.com/photos/ionerd/2518606795/>

1 Einleitung

Der Dänische Chemiker Jan Willem Storm van Leeuwen hat in den vergangenen 30 Jahren Energie- und CO₂-Bilanzen der Nuklearenergie verfasst, teilweise zusammen mit dem US-Physiker Philip Bartlett Smith. Insbesondere nach 2000 fanden die Bilanzen von "Storm-Smith" starke Beachtung, so zum Beispiel auch in Energie und Umwelt (E&U 2006). Von kernenergiekritischer Seite werden diese Arbeiten häufig zitiert, um die hohen CO₂-Belastungen bzw. künftige negative Nettoenergiebilanz der Nuklearenergie zu belegen.

Greenpeace Schweiz hat Gabor Doka beauftragt, die Arbeit von Storm van Leeuwen unabhängig zu begutachten und auf methodische Konsistenz und den heutigen State-of-the-Art der Ökobilanzierung zu überprüfen. Gabor Doka ist Diplom-Chemiker, beschäftigt sich seit 1992 professionell ausschliesslich mit Ökobilanzen und ist unter anderem seit siebzehn Jahren Koautor der international führenden Datenbank für Ökobilanzenecoinvent (ecoinvent 2009) unter Federführung des ETH-Bereichs. Er hat 2008 für das Paul-Scherrer-Institut PSI die für Kernenergie massgebend wichtige, aber bis dahin in Ökobilanzen unberücksichtigte Umweltbelastungen aus dem Uranbergbau (Tailings) ökobilanziert (Doka 2008). Doka Ökobilanzen ist eine unabhängige Einzelfirma in Zürich.

2 Zusammenfassung

Begutachtet wurde der jüngste, veröffentlichte Bericht von Storm van Leeuwen von 2007 (Storm 2007). Grundsätzlich ist zu sagen, dass der Bericht einen weitgehenden Einblick in die von Storm gemachten Analysen erlaubt. Die Befunde dieses Gutachtens wären teilweise ohne die Transparenz von Storms Dokumentation nicht möglich gewesen. Im folgenden die wichtigsten der kritisierten Punkte:

- Storms Resultate stammen weitgehend aus einer **Kostenäquivalenzabschätzung**, d.h. Energieaufwendungen werden aus den ökonomischen Kosten direkt mittels eines Umrechnungsfaktors abgeschätzt. Modernere und detailliertere Methoden wie die Prozessanalyse moderner Ökobilanzen erachtet Storm als unvollständig, obwohl diese weit mehr direkt erfasste und explizite Details aufweisen als Storms indirekte Abschätzung.
- Storms Basis-Daten, also Kosten, stammen oft aus **alten Quellen** der 1970er und 1980er Jahren. Eine Angleichung an aktuellere Verhältnisse findet nur durch Berücksichtigung der monetären Inflation statt. Effizienzverbesserungen werden so nicht erfasst.
- Storm ignoriert in der Energiebilanz die verschiedenen **Wertigkeiten von elektrischer und thermischer Energie** und zählt beide Energieformen ungewichtet zusammen. Eine Verwendung von Primärenergieeinheiten, also der Erfassung von Energieressourcen, lehnt Storm als angeblichen "Verstoß gegen den Energieerhaltungssatz" ab. Beide Haltungen müssen als wenig sachkundig bezeichnet werden.
- Storm betrachtet **nur Kohlendioxid** und ignoriert "aus Datenmangel" weitere Klimagase wie Methan CH₄, Lachgas N₂O oder FCKWs. Dies obwohl moderne Ökobilanzen viele, auch indirekte Emissionen von Klimagasen aufführen.
- Storm hält fest, dass sich je nach Zubausszenario zwischen 2050 und 2080 die Nuklearenergie in eine **Nettoenergiesenke** verwandelt (Fig. H.10). Dazu ist zu sagen, dass *bereits heute* mehr Energie in die Nuklearenergie gesteckt werden muss, als nutzbare Energie bereitgestellt wird, wenn auch der Energiegehalt des genutzten Urans berücksichtigt wird. In der Energiebilanz von Strom wird aber dieser wichtigste Energieträger in der gesamten Nuklearkette gar nicht mitgezählt.
- Strom nimmt in seiner Analyse an, dass benötigte Nuklearenergieinputs mit **keinen CO₂-Emissionen** verbunden sind – auch nicht indirekten. Das heisst Storm ignoriert seine eigenen Resultate in der Berechnung.
- Storm nimmt an, dass sämtliche in seinem System benötigten **Elektrizitätsinputs aus Kernenergie** stammen, was weit von der Realität entfernt ist.
- Durch die beiden letzten Annahmen sind Storms **CO₂-Resultate kleiner** als sie es unter Storms Methodik konsequent gerechnet sein müssten. Dies obschon Storms Resultate zu den höchsten Werten von ähnlichen CO₂-Bilanzen der Nuklearenergie gehören.

Die begutachtete Arbeit (Storm 2007) ist in acht Teilen publiziert (Teile A – H). Verweise auf die Arbeit werden hier unter Angabe der Seitenzahl gemacht. Eine Angabe wie 'Storm 2007 p. C.4' verweist auf Teil C, Seite 4 in (Storm 2007).

3 Kostenäquivalenzabschätzungen vs. Prozessanalyse

Energie- und Ökobilanzierungen, wie sie Storm anvisiert sind äusserst komplex, weil eine Vielzahl von Prozessen integral berücksichtigt werden müssen. Aufgrund dieser Komplexität sind gewisse Vereinfachungen und Abschätzungen zu tolerieren, weil ansonsten ein Abschluss nie möglich wäre. Storm macht insbesondere folgende Vereinfachungen:

- (1) Energieintensität eines Prozesses lassen sich aus den Kosten für diesen Prozess abschätzen
- (2) Der Kostenaufwand für 1 kWh Elektrizität ist identisch mit 1 kWh Wärme

Das Verfahren, den gesamten Energieinput für einen Prozess mit Hilfe der ökonomischen Kosten dieses Prozesses abzubilden wird hier 'Kostenäquivalenzabschätzung' genannt¹. Die Kosten eines Prozesses werden von Storm aus – mehrheitlich alten – Literaturquellen erhoben, und mittels des US Verbraucherpreisindex auf US-Dollar für das Jahr 2000 hochgerechnet. Die so erhaltenen Kosten werden mit einem Umrechnungsfaktor, dem spezifischen Energiebedarf pro Bruttosozialprodukt einer Region² multipliziert, um den Energiebedarf des Prozesses³ zu erhalten. Implizit werden damit in diesem Verfahren weitere Vereinfachungen gemacht:

- (3) Technische Veränderungen über Jahrzehnte werden nur über die Inflation von Kosten abgebildet. Wirkungsgradverbesserungen werden gar nicht abgebildet.
- (4) Ökonomische Aktivitäten ganzer Länder werden über einen einzigen, durchschnittlichen Konversionsfaktor e modelliert.

Während in den 1970er und 1980er Jahren diese Vereinfachungen noch möglicherweise tolerierbar waren, einfach weil zuwenig Informationen über gewisse Prozesse verfügbar waren, muss diese Vereinfachung heute als fragwürdig gelten, weil zwischenzeitlich bessere und detailliertere Informationsquellen vorhanden sind, z.B. (ecoinvent 2009).

Mit den expliziten Prozessanalysen lässt sich auch die Energiebereitstellung besser abbilden und z.B. bis zu den Rohenergieressourcen (Primärenergie) zurückverfolgen. Die Vereinfachung (2) Elektrizität = Wärme ist damit nicht notwendig. Mehr dazu im Kapitel Primärenergie auf Seite 12ff.

3.1 Alle Elektrizitätsbezüge sind nuklear

Storms Methode der Kostenäquivalenzabschätzung führt wie oben dargelegt zu einem Mangel an Detaillierungsgrad. Aus diesem Mangel muss Storm weitere fragwürdige Annahmen in seinem Berechnungsmodell treffen. Zum Beispiel wird bei der Berechnung der CO₂-Emissionen in dem analysierten System angenommen, dass *alle* indirekten Elektrizitätsbezüge aus Nuklearenergie

¹ In englischen Texten ist manchmal auch von der Methode der 'Average Energy Intensity AEI' die Rede.

² Strom verwendet verschiedene spezifische Energieintensitäten mit der Einheit Joule pro Dollar, die er als 'energy/GDP ratio' bezeichnet und mit e abkürzt. Für die OECD verwendet er $e=10.64$ J/\$ (p. F.30), für die USA vermutlich 10.6 J/\$ (p. D.62), für den spezifischen Sektor 'Neue Versorgungsinfrastruktur' (new construction utilities) ein Wert von 12.34 J/\$ (p. F.31), der aus Daten für 1967 über einen Faktor 1.16 aus dem generischen Wert der USA ($=1.16 \cdot 10.6$) extrapoliert wurde (p.F.24 + 30).

³ Das hier beschriebene Verfahren ergibt an sich *Primärenergie*-Einheiten, da der verwendete Umrechnungsfaktor e aus Primärenergieverbrauch berechnet wird. Trotzdem bezeichnet Storm die erhaltenen Energiedaten mit ' $E_{th} + E_{el}$ ' Summe aus Wärme plus Elektrizität, also fälschlicherweise als Summe der benötigten *Sekundärenergien* (Begriffsdefinitionen siehe Fussnote 9 auf Seite 12). Da wegen Abwärmeverlusten die Sekundärenergie immer kleiner ist als Primärenergie, führt Storms Verfahren zu einer Überschätzung des berechneten Sekundärenergie-Inputs, insbesondere bei hohem Elektrizitätsanteil in der Sekundärenergiesumme.

gedeckt werden. Alle Elektrizitätsbezüge innerhalb des betrachteten Systems, also z.B. auch für Bergbau oder die Stahlherstellung, sind als Nuklearenergie verbucht.

Storm 2007 p. G.38: This study assumes the lifetime CO₂ emission of the nuclear system to be produced by burning fossil fuels [...]: the thermal energy inputs. [...] The electrical energy inputs of the nuclear system are assumed to be provided by the nuclear system itself, [...]

In Storms System gibt es demnach im Hintergrund keine Kohlekraftwerke oder Gaskraftwerke, welche die Elektrizität zur Produktion von benötigten Materialien, z.B. Stahl, bereitstellen. Dies ist wenig realistisch, da heute ein bedeutender Anteil der Elektrizitätsversorgung aus solchen Anlagen stammt. Im Europäischen Elektrizitätsnetz stammen z.B. 51% der Elektrizität aus fossilen Quellen und 32% – nicht 100% – aus Kernenergie. Durch Storms Annahme werden so ohne Grund relevante Quellen von CO₂ aus dem System entfernt.

3.1.1 ...aber keine Rekursivität

Storms international meistbeachtetes Resultat ist die relativ hohe CO₂-Intensität von Nuklearstrom von 108 g CO₂/kWh_{el.} (s. Tab G.41 'baseline'). Storm vergisst aber dieses Resultat selbst zu berücksichtigen. Bei der oben erwähnten Berechnung von CO₂-Emissionen in dem analysierten System werden alle Elektrizitätsbezüge mit einem Emissionsfaktor von *Null* g CO₂/kWh_{el.} berücksichtigt, während lediglich die Wärmeenergie mit 270 g CO₂/kWh_{th.} belastet ist (75 g CO₂/MJ_{th.}). Das heisst Storm selbst nimmt hier CO₂-freien Nuklearstrom an – im Widerspruch zu seinen eigenen Resultaten.

Der indirekte Beitrag von CO₂ aus Nuklearenergie hätte auch in Storms Berechnungsmethode berücksichtigt werden können, wenn das Resultat in die Berechnungen zurückgespielen worden wäre (Feedback oder Rekursion). Die fehlenden grauen CO₂-Emissionen aus den Elektrizitätsbezügen würden Storms Resultate so – je nach Uranerzgehalt – um ca. 11-23% erhöhen.

4 Keine Klimabilanz

Storm macht darauf aufmerksam, dass er aus Datenmangel nur Kohlendioxid CO₂ als Klimagas berücksichtigt. Weitere Klimagase wie Methan CH₄, Lachgas N₂O oder FCKWs sind nicht berücksichtigt.

[Storm 2007 p.G.38: Emissions of greenhouse gases other than CO₂ are not quantified in this study, due to the scarcity of data, as explained in Part C5. For that reason this study explicitly uses the unit gCO₂/kWh and not the unit gCO₂e/kWh \(gram CO₂-equivalent per kilowatt-hour\). The latter would imply that other greenhouse gases are included.](#)

Storms Daten geben daher nur reine (fossile) Kohlendioxidemissionen an, während in anderen Quellen meist Kohlendioxid-Äquivalente, inkl. weiteren Klimagasen berechnet werden. In den Daten von ecoinvent machen z.B. Methan und Lachgas zusammen zwischen 6 und 11% der Klimagase für Nuklearenergie aus (ecoinvent 2009).

Diese zusätzlichen Klimagase stammen in der Prozessanalyse nicht direkt aus den Prozessen selbst sondern stellen indirekte "graue" Emissionen aus vor- oder nachgelagerten Prozessen dar.

5 Klippen-Dynamik

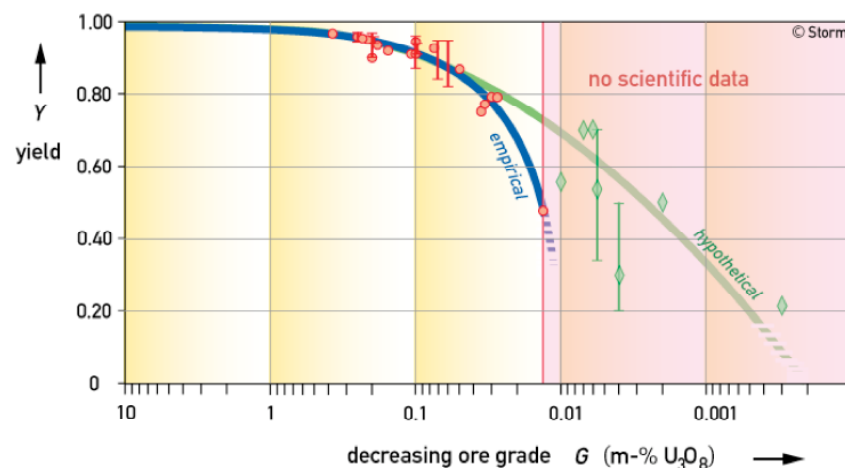
Gewiss einer der interessantesten Aspekte in Storms Arbeit ist der ausdrückliche Hinweis auf die Effizienz-Probleme, die sich ergeben, wenn in Zukunft Uranerz aus geringer konzentrierten Ressourcen produziert werden muss. Der Aufwand pro Kilogramm gewonnenen Uran steigt aus zwei Gründen:

- einerseits weil die **Ausbeute** für geringere Erzgehalte sinkt (extraction yield Y)
- andererseits weil bei tieferem Erzgehalt **mehr wertloses Material** (Gangart) im Bergbau bewegt, verarbeitet und entsorgt werden muss. Dies selbst bei perfekter Ausbeute.

Storm berücksichtigt beide Einflüsse indem er zur Berechnung des Energieinputs im Bergbau+Aufbereitung (mining+milling) pro kg Uranoxid einen konstanten Energiewert durch die Ausbeute (Y) und durch den Erzgehalt (G) dividiert (p. E.5). Für niedrige Erzgehalte kann Lösungsbergbau angewendet werden (In-situ leaching ISL), wobei weniger Gangart verarbeitet werden muss⁴. Storm nimmt mit Verweis auf zwei Literaturquellen an, dass der Energiebedarf pro Tonne Uran bei ISL ähnlich hoch ist, wie bei konventionellem Bergbau (p. D.29).

Storm präsentiert zur Uranminen-Ausbeute Y Literatur-Daten aus Feldmessungen und hypothetischen Modellrechnungen (p. D.22). Daraus extrapoliert er zwei Kurven für Ausbeute vs. Erzgehalt: Eine 'empirische' und eine 'hypothetische' (p. E.6). Die zweite Kurve basiere auf 'nicht wissenschaftlich verifizierbaren Daten'. In der weiteren Berechnung verwendet Storm nur die erste, empirische Kurve.

Extrapoliert sinkt diese gezeigte empirische Kurve auf Null Prozent Ausbeute bei einem Erzgehalt von rund 0.01% U_3O_8 . Bei Null Prozent Ausbeute steigt der Bergbau-Aufwand ins Unendliche. Der von Storm gewählte Kurvenverlauf der Ausbeute bestimmt somit massgeblich die Lage der Energieklippe. Mehr dazu unten.



⁴ Kritische Punkte des Lösungsbergbaus liegen bei der sehr langwierigen Dekontamination des bearbeiteten Untergrundes und den ökologischen Schäden bei unvollständigem Erfolg dieser Massnahmen. Die auftretende toxische Belastung kann aber weder mit einer Energie- noch mit einer Klimabilanz zutreffend abgebildet werden.

(Abbildung E.3 aus Storm 2007)

5.1 Alte Datenquellen

Leider stammt das jüngste Literaturzitat für die Minen-Ausbeuten in Storms Arbeit von 1980. Storm erklärt jüngere Daten pauschal für zweifelhaft, weil nicht in jedem Fall klar sei, auf welche Referenzgrösse sich die Ausbeute beziehe.

Storm 2007 p. D.22: Recently reported yield data are not always unambiguous. In most cases it is not clear on which quantity of uranium the reported yields are based.

Er unterlässt es, die jüngeren Daten aufzuführen oder einen Vergleich mit den von ihm verwendeten älteren Daten zu machen.

5.2 Auslassungen

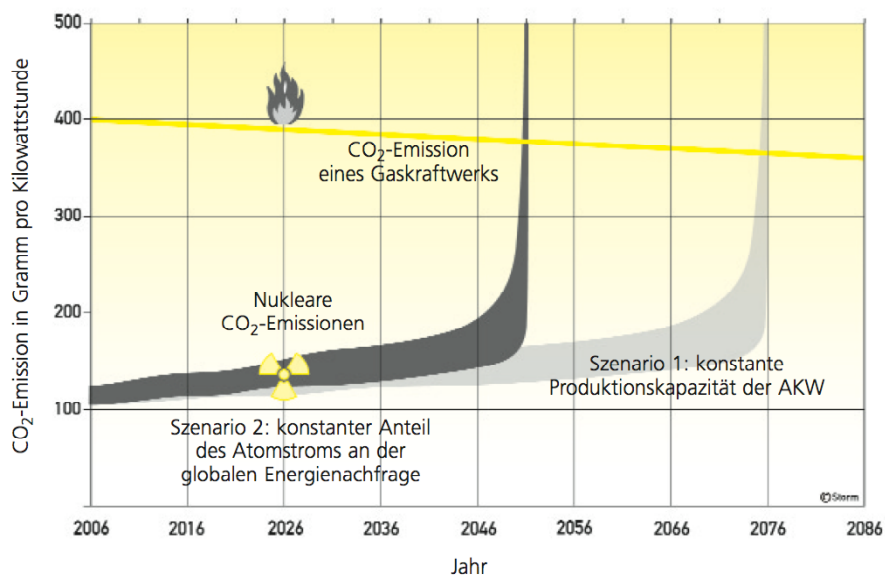
Storm gibt in Formel E.8 eine Formel an, welche die hypothetische (grüne) Ausbeutekurve wiedergibt.

(Storm 2007, Gleichung E.8)
 Hypothetische Uranminen-Ausbeute $Y = 0.98 - 0.0723 (\log G)^2$
 $G = \text{Erzgehalt in } U_3O_8\text{-Gewichtsprozent} * 100, 0 \leq G \leq 100$

Diese Kurve wurde aber in den weiteren Berechnungen nicht verwendet. Verwendet wurde die empirische (blaue) Kurve aus Abb E.3. Für diese Kurve gibt Storm aber keinen Formalismus an.

5.3 Bedeutung der Ausbeute-Abnahme

Wird Storms Ausbeute-Kurve akzeptiert, bestimmt praktisch sie alleine die Lage der Energieklippe. Egal, welche Charakteristik und Effizienz das nachgelagerte Nuklearsystem genau hat: wenn der Aufwand für Natururan gegen unendlich geht (und keine anderen Spaltstoff-Quellen vorhanden sind) wird das Nuklearsystem als Ganzes gegenüber anderen Energiequellen zu ineffizient. Dies ist eine der Kernaussagen von Storm. Auch neuentdeckte Uranvorkommen können diesen Ausgang nur zeitlich hinausschieben, aber nicht grundsätzlich vermeiden.



Da die Energieklippe im kritischen Bereich für geringe Konzentrationen sehr steil ist, spielt es nur eine geringe Rolle von welchem anfänglichen Wert man startet oder auch welche Effizienzverbesserungen in Kraftwerken antizipiert werden. In diesem Sinne muss man sich mit Blick auf die Zukunft weniger über die Grösse der gegenwärtigen Differenzen zwischen Storms und anderen CO₂-Analysen von Nuklearstrom aufhalten, sondern darüber, ob Storms Modellierung des Uranabbaus

realistisch ist und tatsächlich eine unabwendbare Energieklippe erreicht wird, wenn Uranerzkonzentrationen von 0.01% U_3O_8 erreicht werden. Die aktuelle abgebaute Uranerzkonzentrationen beträgt weltweit ca. 0.22% U_3O_8 (Dones 2007) und liegt am tiefsten in Südafrika mit 0.019% (Doka 2008). Aber auch bei dieser Konzentration liegen die Ausbeuten gemäss Storm noch bei relativ hohen 65%. In Südafrika wird Uran zusammen mit Gold abgebaut. Darum wird der Minenbetrieb in Südafrika auch sehr wahrscheinlich weitergeführt werden, selbst wenn die Uranproduktion eingestellt würde, bzw. profitiert der Südafrikanische Uranabbau von gemeinsam genutzter Bergbaufrastruktur für Gold- und Uranproduktion.

Eine Überprüfung von Storms Angaben zur Uranminen-Ausbeute Y mit modernen Daten wäre angezeigt.

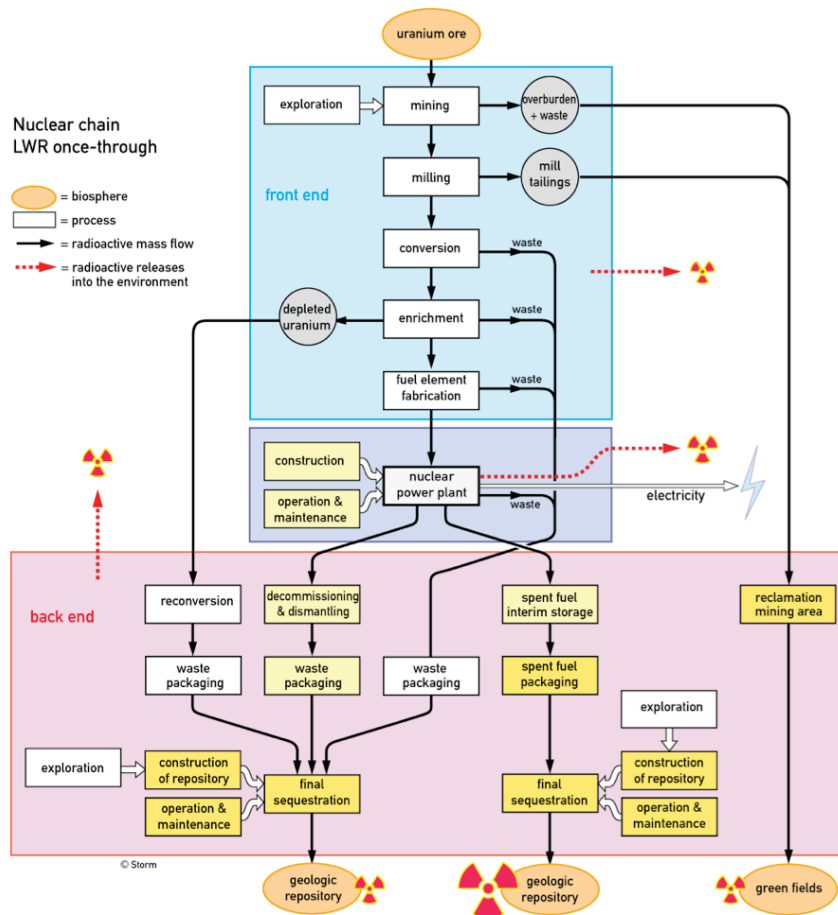
5.4 Nuklearenergie ist schon heute eine Nettoenergiesenke

Storm berechnet den Zeitpunkt, an dem sich die Kernenergiekette von einer Nettoenergiequelle zu einer Nettoenergiesenke verwandelt (Fig. H.10). Diese Betrachtung kommt aber nur unter der Voraussetzung zustande, dass der benutzte Uran-Spaltstoff selbst *nicht* als Energieaufwand gezählt wird. D.h. Storm betrachtet alle Energieaufwendungen, *ausser der direkten Hauptenergiequelle der Kernenergie selbst*. Er erfasst die Energieinputs der nuklearen Prozesskette, d.h. möglichst aller rechteckigen Prozesse in folgender Abbildung, lässt dabei aber den wichtigsten Energieinput in der ganzen Kette "Uranerz in Bergbau" (uranium ore \rightarrow mining) weg.

Selbstverständlich stellt auch Uranerz einen energetischen Input dar; es ist eine nicht erneuerbare Energieressource. An sich ist es egal, ob wir eine Energieressource verbrauchen, um damit Strom erzeugen, um eine Fabrik zu betreiben oder um ein Kraftwerk zu bauen: verbraucht ist die Ressource genauso. Unter dem Gesichtspunkt der Ressourcenschonung kann die Sonderstellung des direkten Uranerzinputs nicht aufrecht erhalten werden⁵. Der direkte Betriebsstoff eines Kraftwerks ist ebenso ein Energieinput ins Gesamtsystem, wie die indirekt benötigten Ressourceninputs.

Storms Aussagen verschleiern – wenngleich wohl unabsichtlich – die Tatsache, dass Kernkraftwerke in jedem Fall und auch schon heute Nettoenergiesenken sind: Der gesamte Energieinput ist immer grösser als der bereitgestellte Energieoutput.

⁵ Der Ursprung dieser besonderen Betrachtungsweise liegt in der Berechnung der sogenannten energetischen Rückzahldauer ERZ, wie sie in den Energieanalysen der 1970er Jahre populär war. Dabei wird gefragt, *wie lange* ein Kraftwerk laufen muss, um gleichviel Energie bereitgestellt zu haben, wie für den Kraftwerks-Bau, - Betrieb, -Unterhalt und -Abbruch gesamthaft investiert werden muss. Kraftwerke mit kleiner ERZ gehen relativ haushälterischer mit Energie um und sind daher tendenziell auch für den Kraftwerksbetreiber ökonomisch attraktiver. Diese Betrachtung erlaubt auch z.B. den energetischen Trade-off zwischen aufwendigerer Kraftwerkstechnologie und den resultierenden Wirkungsgradgewinnen integral abzubilden. Bei diesen Fragestellungen wird aber die *direkte* Beanspruchung von Kraftwerks-Betriebsstoff immer als vorgegeben hingenommen und gleichsam aus der Betrachtung ausgeklammert. D.h. der Kraftwerks-Betriebsstoff, z.B. Uran in Brennstäben für das Kraftwerk selbst, wird nicht als eine *Energie-Investition* verstanden. Ein Kraftwerk wird in dieser Betrachtung dann zu einer Netto-Energiesenke, falls die investierte Energie erst gegen Lebensende des Kraftwerks kompensiert wird; also wenn die ERZ gerade etwa der Lebensdauer des Kraftwerks entspricht.



(Abbildung B.10 aus Storm 2007)

Storms Nettoenergiebilanz des Gesamtsystems beträgt gemäss Tab. G.35 gegenwärtig rund **plus 80 Gigajoule pro Kilogramm Natururan** (s. auch Fig. H.7). Ein Kilogramm Natururan enthält Uranisotope, welche mit gegenwärtiger Technologie rund 900 Gigajoule Spaltwärme freisetzen können⁶. Ein Kilogramm Natururan entspricht also 900 Gigajoule Primärenergie. Wird Natururan auch als Energieinput berücksichtigt, so liegt die Nettoenergiebilanz bereits heute bei **minus 820 Gigajoule pro Kilogramm Natururan**. Kernenergie ist also schon heute eine Nettoenergiesenke. Diese Aussage ist ohne umfangreiche Berechnungen anzuerkennen: denn der zweite Hauptsatz der Thermodynamik lässt gar keine andere Möglichkeit offen⁷.

⁶ Diese Angabe stammt aus (ESU 1996, p.III.18). Oft werden auch Werte von 460 GJ/kg Natururan verwendet. Für letzteren Wert wird berücksichtigt, dass rund 49% der aus der Erdkruste entnommenen Uranisotope *nicht* in Kernanlagen gespalten wird, sondern in Form von abgereichertem Uran (depleted uranium DU) oder in abgebrannten Brennstäben verlustig gehen. Diese realen Effizienzverluste des Nuklearsystems werden durch Verwendung des tieferen Wertes nicht so abgebildet, wie es die Aufgabe der Ökobilanzierung wäre. Effektiv wird dadurch speziell und ausschliesslich für Kernbrennstoffe eine primärenergetische Gutschrift gewährt, welche nicht zulässig ist. Andere Primärenergieträger werden in Ökobilanzen mit ihrem *vollen* Energiegehalt gezählt, unabhängig davon, ob die nachfolgende Prozesskette das Material vollständig nutzt oder nicht. So wird zum Beispiel auch die Verwendung von Rohöl für Kunststoffe als Verbrauch einer Energieressource gezählt, selbst wenn der Kunststoff nach Gebrauch nicht verbrannt wird.

⁷ Siehe dazu auch die Abbildung unter <http://www.doka.ch/sankey1.htm#sample> (14. Dez 2009)

6 Primärenergie

6.1 Addierung von Elektrizität und Wärmeenergie

Storm 2007 berechnet in seiner Energieanalyse die gesamthaft benötigten Energieinputs der Nukleartechnologie. Im Kapitel Methodik erklärt er dabei, weshalb Elektrizität und Wärme *nicht* als unterschiedliche Energieformen angesehen werden müssen, sondern ohne Gewichtung direkt auf der Stufe der bezogenen Endenergie nach ihrem Energiegehalt (Joule) zusammengezählt werden dürfen. In anderen Studien wird Elektrizität als die aufwendigere Energieform im Vergleich zu Wärmeenergie angesehen, was z.B. mit einem Gewichtungsfaktor f ausgedrückt werden kann. Storm findet aber der Faktor f dürfe nicht grösser als 1 sein:

Storm 2007 p. C.4: $E_{\text{prim}} = E_{\text{th}} + f \cdot E_{\text{el}}$ (Eq C.1)

In our view any factor $f > 1$ for nuclear energy is inconsequent [f = Primary energy input/electrical energy output]. One joule electricity, from whatever source, can be converted into one joule heat in an electric boiler or kitchen stove. The sole usable output of nuclear power plants is electricity, as is of hydro, PV and wind.

Dieses Vorgehen muss als wenig sachkundig bezeichnet werden. Für eine Energieeinheit Elektrizität respektive eine Energieeinheit Wärme müssen ganz unterschiedliche Aufwendungen geleistet werden. Die Anwendung von Elektrizität oder Wärme sind verschieden, weil mit Wärme nicht dasselbe möglich ist wie mit Elektrizität. Diese Fähigkeit oder Wertigkeit der produzierten Energieform anzuerkennen und zu unterscheiden ist wichtig, insbesondere in einer Energiebilanz. Ein Gegenbeispiel zu Storms Auffassung: Enorm viel Wärmeenergie ist an sich verfügbar z.B. in der Form von Umweltwärme. Diese Umweltwärme ist aber auf einem *sehr niedrigen Temperaturniveau* und kann daher gewisse Leistungen nur schwer oder gar nicht erbringen, bzw. muss dazu aufkonzentriert werden z.B. mit Wärmepumpen. In einer umfassenden Energiebilanz muss auch der Aufwand für eine solche Konzentrierung – für die Umwandlungstechnologie – berücksichtigt werden. Storm ignoriert diese relevanten Unterschiede mit der oben zitierten lapidaren Bemerkung, dass ja Elektrizität in einem elektrischen Kocher in Wärme umgewandelt werden könne. Aber ein Handy lässt sich nicht aufladen, indem man es auf einen Heizkörper legt.

Der von Storm erwähnte Faktor f ist dazu da, um den Energieverbrauch von Prozessen in Primärenergieeinheiten auszudrücken⁸. Primärenergie entspricht den *aus der Erde entnommenen Energieressourcen*. Um den unterschiedlichen energetischen Aufwand der Elektrizität- resp. Wärmeherstellung festzustellen, werden in modernen Ökobilanzierungen in der Regel alle Energieverbräuche in Form von Energieressourcen gezählt. D.h. man geht zurück im Lebenszyklus der Energieversorgung bis zum Ort, an dem man z.B. Rohöl, Rohkohle, Erdgas oder Uranerz aus dem Boden genommen hat. Diese im Ressourcenmaterial gebundenen Energiemengen werden als *Primärenergie* bezeichnet⁹.

So kann zum Beispiel Rohkohle gefördert und in Feuerungen zur Wärmeherstellung verbrannt werden; sie kann aber auch in Kraftwerken zur Elektrizitätsproduktion verbrannt werden. Aus einem Kilogramm Kohle kann etwa 20 Megajoule Wärme gewonnen werden, aber in heutigen Kraftwerken nur etwa 7 Megajoule Elektrizität. D.h. Elektrizität ist viel energieaufwendiger als Wärme, oder *primärenergieaufwendiger*. Für 7 Megajoule *Elektrizität* braucht es ca. 21 Megajoule *Primärenergie*

⁸ Genau genommen müsste auch ein Bezug von Wärmeenergie in die benötigte Primärenergie umgerechnet werden – mittels eines anderen Faktors als für Strom. Dieser Faktor ist für fossile Energieträger aber meistens einigermassen nahe bei 1 und wird bei Überschlagsrechnungen meist vernachlässigt.

⁹ Die in der Feuerung oder im Kraftwerk erzeugte Wärme- oder Stromenergie wird dagegen als *Sekundärenergie* bezeichnet. Die beim Endkunden ankommende Energie (nach z.B. Netz- und Verteilverlusten) wird als *Endenergie* bezeichnet. Die benutzten Geräte beim Endkunden können weitere Verluste aufweisen, bis sie die eigentlich gewünschte Funktion erfüllen, z.B. Stand-by-Verluste. Die effektiv nutzbringende Energie, als z.B. Elektrizität, die tatsächlich ein Handy lädt bzw. in diesem Prozesse betreibt, wird als *Nutzenergie* bezeichnet.

in Form von Kohle-Ressourcen, was $f=3$ entspricht. Die Aussagen von Storm zeigen, dass er sich dieser Lebenszyklus-Prozesskette der Energieversorgung nicht genügend bewusst ist, oder Inputs und Outputs in dieser Kette verwechselt¹⁰. Storms Aussagen, dass die Verwendung von Primärenergie-Einheiten dem Ersten Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltung) widerspreche, entspringen sehr wahrscheinlich solchen Missverständnissen.

[Storm 2007 p. C.3: In fact the use of 'primary energy units' conflicts with the First Law of Thermodynamics: energy cannot be produced, nor destroyed, only converted from one kind into another.](#)

Der Vorteil der Verwendung von Primärenergieeinheiten statt z.B. Endenergiesummen ist im Gegenteil, dass die Einschränkungen der Thermodynamik berücksichtigt werden und insbesondere *ungenutzte Verluste* von Energie, z.B. Abwärme von Kraftwerken oder Verteilverluste, in der Analyse gebührend berücksichtigt werden.

Storm wirft vor, dass in detaillierten Ökobilanzdatenbanken wie ecoinvent Primärenergiewerte aus einem *pauschalen* Konvertierungsfaktor für Endenergie berechnet werden. Dies entspricht nicht den Tatsachen. In ecoinvent werden spezifische und detaillierte Prozessketten der Energiebereitstellung (Öl, Erdgas, Kohle, etc.) bilanziert, um unterschiedlichste Primärenergieentnahmen aus der Natur unmittelbar festzuhalten.

[Storm 2007 p. C.4: In most energy analyses, e.g. ISA 2006 \[Q325\] and Ecoinvent 2003 \[Q333\], the electric secondary inputs of the nuclear system are converted into 'primary energy units' \(see also Figure C.3\). This method introduces large and needless ambiguities, due to the fact that the conversion factor \$f = 2.6\$ depends on year, place and implicit assumptions with regard to the generating technology and the final use of the energy \[emphasis Doka\].](#)

Eine Berechnung von Primärenergieeinheiten – sei es über einen pauschalen Faktor f oder noch besser über detaillierte Prozessketten-Modelle – sollen die unterschiedlichen Energiewertigkeiten von Elektrizität und Wärme ausdrücken. Die fehlende Berücksichtigung der Energiewertigkeiten von Elektrizität und Wärme ist eine 'Kinderkrankheit' der in den 1970er Jahren aufkommenden Energieanalysen. Storm basiert seine Arbeit auf entsprechenden Methoden.

[Storm 2009: The methodology used in this study has been validated by numerous peer reviewed publications in the 1970s and 1980s.](#)

6.2 Interne Widersprüche

Ungeachtet Storms oben zitierter, kategorischer Kritik an der Verwendung von Primärenergieeinheiten (Storm 2007 p. C.3) benutzt er selber Primärenergiegrößen, um seine Energiebilanz zu rechnen.

[Storm 2007 p. F.30: An important parameter in energy analysis is the general energy/GDP ratio, also called the energy intensity, of a country, \$e\$, defined as the ratio of](#)

¹⁰ Noch klarer zeigt sich Storms Missverständnis im Abschnitt (Storm 2007 p.A.5), wo dargelegt wird, dass aus 27 Einheiten Primärenergie in einem KKW 10 Einheiten Strom erzeugt werden, aber in einer Brennstoffzelle mehr, nämlich 16 Einheiten Strom. Storm sieht dies als Verstoss gegen den Energieerhaltungssatz (1. Thermodynamischer Hauptsatz) an, da durch Brennstoffzellen 6 Einheiten Strom mehr erzeugt werden als in einem KKW. Dabei bemerkt er selbst den höheren Wirkungsgrad von Brennstoffzellen (60%) und müsste erkennen, dass in einem KKW mit Wirkungsgrad von ca. 30% eben mehr Energie in *ungenutzte Abwärme* verwandelt wird und dies alles im Einklang mit der Energieerhaltung steht. Storm interpretiert Primärenergie fälschlicherweise als *Output* aus einem Nuklearsystem, der wieder in Strom umgewandelt werden könnte, während korrekterweise Primärenergie die aus der Natur entnommenen, also ganz anfänglichen *Inputs* an Energieträgermaterialien darstellen (Storm 2007 p.A.5: *More serious is the fact that this way of manipulating energy data conflicts with the First Law of Thermodynamics: energy cannot be produced, nor destroyed. Energy can only be converted from one kind to another. A simple example will explain this. [World nuclear electricity production is 10 Exajoules, Fig.A.3] The 27 virtual energy units from nuclear [Exajoule Primary energy in uranium ore] cannot be reconverted into electricity via fuel cells (efficiency 60%), producing 16 units electricity. In this way 6 units (16 – 10) electricity would be created out of nothing, in conflict with the First Law.*)

the total domestic **primary energy consumption** in year i and the gross domestic product in year i , given in energy units per US dollar of year i ,

In einer nachgelagerten Einführung der Methodik der Energieanalysen wird – im Widerspruch zu Storms vorangestellter Kritik – die Verwendung von Primärenergie zur Berechnung von Energieintensitäten pro BSP-Dollar sogar vorgegeben.

Storm 2007 p. F.23: $e_i = E_{\text{prim}(i)} / \text{GDP}_i$

e_i = energy/GDP ratio of year i [J/\$ $_i$]

$E_{\text{prim}(i)}$ = primary energy consumption in year i [J]

GDP_i = gross domestic product of year i [\$ $_i$]

Auch die von Storm zuvor verteidigte ungewichtete Addierung von Elektrizität und Wärme wird nicht vollständig vollzogen und in späteren Kapiteln werden Wärmeenergie und Elektrizität sehr wohl unterschieden, um CO₂-Emissionen zu berechnen.

Storm 2007 p. G.38: This study assumes the lifetime CO₂ emission of the nuclear system to be produced by [...] the thermal energy inputs. [...] The electrical energy inputs of the nuclear system are assumed to be provided by the nuclear system itself, (s. auch p. C.6)

7 Energie oder Geld

Storm betont, dass für eine aussagekräftige Bilanz über die Wirksamkeit der Nuklearenergie als Energiequelle Energieeinheiten zu wählen sind, da Geldeinheiten zu unbeständig sind.

Storm 2009: Energy is a conserved quantity, whereas the value of money is unpredictable beyond a very short time horizon. Energy debts cannot just be written off as uncollectable. Just for that reason we choose for energy analysis as our tool.

Storm bevorzugt Energie als beständige Kenngrösse, während er Geldeinheiten als zu unbeständig betrachtet. Dem kann an sich zugestimmt werden, insbesondere da Storm ja erklärermassen eine Energiebilanz, bzw. die Energie-*Nettobilanz* der Nuklearenergie berechnen will, und keine ökonomische Bilanz. Leider benutzt er aber trotz dieser Aussage selber Geldeinheiten, um daraus Energieeinheiten umzurechnen. In der verwendeten Methode der Kostenäquivalenzabschätzung werden Kosten von Prozessen in Energieeinheiten umgewandelt, indem man mit dem Quotient des (nationalen) Energieverbrauchs und Bruttosozialprodukt multipliziert. Wenn Geldeinheiten unzuverlässige Kenngrössen darstellen, dann sind es aus Geld umgerechnete Energieäquivalente genauso.

8 Aufwendungen für Arbeitskräfte

Storm kritisiert die Methodik der detaillierten Prozessanalyse mit Verweis auf fehlende Berücksichtigung von Arbeit und anderen beitragenden Tätigkeiten zu Gunsten seiner Kostenäquivalenzabschätzung.

[Storm 2007 p. F.23: Process analysis, introduced in Part C, leads to a large underestimation of the total construction energy requirements, when labour and supporting activities of the construction are discounted, see e.g. Rombough & Koen 1978 \[Q120\] and Bullard, Penner & Pilati 1978 \[Q102\].](#)

Dass menschliche Arbeit in modernen Prozesskettenanalysen heute meist weggelassen wird, stimmt. Auch benötigte menschliche Arbeit könnte konsistent in eine Prozesskettenanalyse integriert werden, z.B. via Transport-Aufwand für den Arbeitsweg oder der Nahrungsmittelproduktion für die zusätzlich benötigten Kalorien von körperlich schwer Arbeitenden, aber dies ist unüblich. Trotz Storms Kritik schreibt er selbst, dass auch in seiner Energiebilanzierung menschliche Arbeit ohne Vorbelastung oder graue Energie einfließt. Der beanspruchte Vorteil von Kostenäquivalenzabschätzungen im Vergleich zu modernen Prozesskettenanalysen ist daher nicht ersichtlich.

[Storm 2007 p. C.2: In the generally accepted convention of energy analysis only human labour and raw materials \(as found in nature\) are considered to have zero embodied energy.](#)

Arbeitswege können in reinen Energieanalysen unter Umständen relevant werden, aber sind in CO₂-Bilanzen von Produkten meistens wenig relevant¹¹. Bezüglich unterstützenden Tätigkeiten ist zu sagen, dass in Prozesskettendaten von ecoinvent weitestgehend auch sehr indirekte Aufwendungen erfasst oder zumindest abgeschätzt werden¹². Storm hat recht, wenn er sagt, dass diese indirekten Aufwendungen wichtig sein können; er hat nicht recht, wenn er sagt, dass diese in Prozesskettenanalysen nicht berücksichtigt seien, zumindest, wenn er damit gegenwärtige Arbeiten mitmeint.

¹¹ Zur Abschätzung der Relevanz des Arbeitsweges hier eine pessimistische Überschlagsrechnung: Pro KKW arbeiten 1000 Personen; alle legen einen Arbeits(hin)weg von je 20 km alleine per PKW zurück und arbeiten 240 Tage pro Jahr. Ein durchschnittlicher PKW emittiert ca. 290 g CO₂ pro Fahrzeugkilometer (ecoinvent 2009). Pro Jahr resultieren somit 2.8 Millionen Kilogramm CO₂ aus den zurückgelegten Arbeitswegen allein. Ein 1000 MW KKW erzeugt ca. 7.2 Milliarden kWh Elektrizität pro Jahr. Die Arbeitswege der Mitarbeiter machen also pessimistisch geschätzt 0.38 g CO₂/kWh aus, was nur etwa 0.4% der von Strom berechneten CO₂-Intensität von Nuklearstrom ausmacht. Die Berücksichtigung der Arbeitswege wird das Endresultat daher kaum wesentlich beeinflussen. In vor- und nachgelagerten Prozessen finden weitere Arbeitswege statt, aber diese sind in der Prozesskette noch weiter "verdünnt" und dürften ebenfalls kaum relevant werden. Arbeitswege dürfen daher um Aufwand zu sparen ohne Qualitätsverlust aus der Analyse weggelassen werden. Vorzuziehen ist allerdings eine explizite Berücksichtigung, weil damit die tatsächliche Relevanz auch gezeigt werden kann.

¹² Hier am Beispiel der ecoinvent-Datenbank wie weit benötigte Aufwendungen in Prozesskettendaten zurückverfolgt werden: Der KKW-Bau benötigt Beton. Bei der Bilanzierung von einer Tonne Beton wird der benötigte Zement, der Sand bzw. Kies sowie Wasser bilanziert. Die Zementproduktion beispielsweise wiederum berücksichtigt den Abbau der Rohstoffe wie Kalk und Energieträger z.B. Kohle, sowie die Herstellung und die Entsorgung der benötigten Infrastruktur (Zementofen). Bei der Herstellung des erbauten Zementofens benötigter Stahl wird ebenfalls anteilmässig bilanziert, auch der dabei benötigte LKW- oder Bahntransport von der Stahlhütte zur Zementfabrik. Der intern abgestimmte und modulare Aufbau von Ökobilanzdatenbanken erlaubt auch solche sehr weit entfernte, indirekte Belastungen explizit und transparent mit in die Bilanz einzubeziehen, um möglichst umfassende Lebenszyklusdaten zu erhalten. Dabei können auch Schleifen (Rekursionen) berücksichtigt werden, also dass z.B. der Bau eines Stahlwerks selbst Stahl benötigt. Ecoinvent befreit den Analytiker davon, selber eine Vielzahl von Hintergrunddaten recherchieren zu müssen und hält trotzdem die verschiedenen Einzelprozesse einsehbar und anpassbar. Der reiche Umfang von ecoinvent profitiert von den letzten 17 Jahren an Recherche- und Inventararbeiten.

9 Schlussfolgerungen

In einer kohlenstoffbasierten Ökonomie kann auch Kernenergie nicht CO₂-frei sein. Dies ist unter einer Lebenszyklusperspektive, welche auch indirekte Emissionen erfasst, unbestreitbar. Allein über das genaue Ausmass der CO₂-Emissionen herrschen sehr verschiedene Auffassungen und Aussagen.

Storms Resultate fussen nach der persönlichen Meinung des Gutachters auf einer heute weitgehend obsoleten Methodik sowie oft auch auf alten Grundlagendaten. Storm sollte mit Vorteil seine beträchtlichen Fachkenntnisse in moderne Methoden der Ökobilanzierung mittels Prozessanalyse einfliessen lassen. Davon würden nicht nur Energie- oder Klimabilanzen der Nuklearenergie profitieren, sondern es würden auch umfassendere Umweltbilanzen profitieren, welche weitere umweltrelevante Belastungen wie z.B. toxische Schadstoffe erfassen.

Eine von Storms wichtigsten Beobachtungen – die Abhängigkeit der Ausbeute des Uranerzbergbaus mit sinkendem Uranerzgehalt – sollte mit aktuellen Daten abgeklärt werden.

10 Quellennachweise

Das Datum hinter Internetadressen bezeichnet den Zeitpunkt der Besichtigung.

Doka 2008	Non-radiological emissions from uranium tailings: A generic, global model for Life Cycle Inventory data. Doka Life Cycle Assessments, Zurich, November 2008. http://www.doka.ch/PSLuraniumtailingsDoka.pdf (19 Feb 2009)
Dones 2007	Kernenergie. Dones R., ecoinvent report v2.0 No. 6-VII, Paul Scherrer Institut Villigen & Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007, http://www.ecoinvent.ch (18. Dez 2007)
E&U 2006	Atomstrom ist keine Lösung für Klimaprobleme und Energieknappheit. Storm van Leeuwen J.W. Energie & Umwelt Nr. 4, S.4-7, 2006, Das Magazin der Schweizerischen Energie-Stiftung SES http://www.stormsmith.nl/publications/E&U_4_06-Energieklippe.pdf (20. Aug 2009)
ecoinvent 2009	Schweizerische Datenbank für Ökoinventare ecoinvent. Ecoinvent Centre, EMPA, Dübendorf http://www.ecoinvent.org/
ESU 1996	Ökoinventare von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Gruppe Energie - Stoffe - Umwelt (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich und Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, Paul Scherrer Institut, Villigen, Frischknecht R., Bollens U., Bosshart S., Ciot M., Ciseri L., Doka G., Dones R., Gantner U., Hischier R. and Martin A. 3rd Edition. Bundesamt für Energie (Hrsg.), Bern, CH.
Storm & Smith 2005	Nuclear Power: the Energy Balance. Storm van Leeuwen J.W & Smith P.B., August 2005. http://www.stormsmith.nl/ und http://www.stormsmith.nl/report20050803/Introduction.pdf etc. (21. Aug 2009)
Storm 2007	Nuclear power - the energy balance. Storm van Leeuwen J.W. Ceedata Consultancy, Netherlands, October 2007. http://www.stormsmith.nl/ und http://www.stormsmith.nl/report20071013/partA.pdf etc. (21. Aug 2009)
Storm 2009	Nuclear power – the energy balance. Text der Homepage von Storm & Smith http://www.stormsmith.nl/ (21. Aug 2009)