

**TINU SCHNEIDER**  
Datenanalyse

Martin Schneider  
Dipl. Umwelt-Ing. ETH  
Gartenstrasse 11  
CH-3600 Thun

Telefon +41 (0)31 301 00 03  
Mobil +41 (0)76 445 83 01  
schneider@tinuschneider.ch  
www.tinuschneider.ch

# Sensitivitätsanalyse KAR-Modell

Wie stark beeinflussen die einzelnen Parameter das Resultat?

Nr.	Parameter / Variablen / Daten					Prozentual	Absolut	Abweich Total bzgl. Total	ABSOLUT	
									Bar	Line
12	Stat	BW	TB	Alle Fraktionen	Neubaurate	2.731	4.234	2.26%	Bar	Line
1	Stat	BW	HB	EFH, MFH	Neubaurate	2.649	3.759	2.00%	Bar	Line
135	GL	BW	TB	Material	Lager, Kies/Sand	3.535	2.907	1.55%	Bar	Line
4	Stat	BW	HB	DLG, PRG, UBR	Neubaurate	2.054	2.666	1.42%	Bar	Line
35	Stat	BW	HB	DLG, PRG, UBR	Aushub bei Neubau	1.438	1.534	0.82%	Bar	Line
34	Stat	BW	HB	EFH, MFH	Aushub bei Neubau	1.434	1.530	0.81%	Bar	Line
36	Stat	BW	TB	Alle Fraktionen	Aushub bei Neubau	1.014	1.082	0.58%	Bar	Line
112	GL	BW	HB	Materialisierung	MFH, Beton	0.549	1.007	0.54%	Bar	Line
145	GL	BW	TB	Material	Lager, Kies/Sand	0.709	0.757	0.40%	Bar	Line
49	GL	BW	HB	Geb.Vol	MFH 1976-2000	0.508	0.727	0.39%	Bar	Line
136	GL	BW	TB	Material	Lager, Belag	1.403	0.702	0.37%	Bar	Line
7	Stat	BW	TB	Kies/Sand	Erneuerungsrate	2.318	0.674	0.36%	Bar	Line
137	GL	BW	TB	Material	Lager, Beton	0.695	0.652	0.35%	Bar	Line
48	GL	BW	HB	Geb.Vol	MFH 1961-1975	0.449	0.643	0.34%	Bar	Line
13	Stat	BW	GP	Grossprojekte	Anfall Aushub	0.431	0.579	0.31%	Bar	Line
107	GL	BW	HB	Materialisierung	EFH, Beton	0.276	0.506	0.27%	Bar	Line
43	GL	BW	HB	Geb.Vol	EFH 1976-2000	0.347	0.497	0.26%	Bar	Line

Erstellt von Martin Schneider, TINU SCHNEIDER Datenanalyse, Thun  
Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)  
Februar 2016

# Inhalt

<b>1 Hintergrund</b>	<b>3</b>
<b>2 Die Sensitivitätsanalyse</b>	<b>3</b>
2.1 Aufbau . . . . .	3
2.2 Resultate . . . . .	5
<b>3 Fazit</b>	<b>9</b>

## Impressum

Auftraggeber David Hiltbrunner  
Sektion Bauabfälle und Deponien  
Bundesamt für Umwelt BAFU

Autor Martin Schneider  
TINU SCHNEIDER Datenanalyse  
Gartenstrasse 11  
3600 Thun

Modell [www.kar-modell.ch](http://www.kar-modell.ch)

## Disclaimer

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## 1 Hintergrund

Das Bundesamt für Umwelt, Abteilung Abfall und Rohstoffe, Sektion Bauabfälle und Deponien (BAFU) beteiligt sich seit 2014 am KAR-Modell und lässt die Materialflüsse von Kies, Aushub und Rückbaumaterial für das System 'Schweiz' modellieren. Als Teilprojekt wurde im Frühling 2015 eine systematische Sensitivitätsanalyse des KAR-Modells konzipiert und durchgeführt.

Das KAR-Modell benötigt für die Kalibration der Materialflüsse ein sorgfältiges Einstellen von vielen Parametern. Für viele dieser Parameter liegen keine erhobenen Daten zu Grunde, sie müssen abgeschätzt werden, und sollten in einem 'plausiblen Bereich' liegen. Das heisst, der Modellierer soll erklären können, warum für diese spezifische Lösung einem Parameter der gewählte Wert zugewiesen wurde.

Hier liegt ein dem KAR-Modell inhärentes Problem: Die Anzahl der Parameter ist viel grösser als die Anzahl der erhobenen Daten, mit welchen das Modell validiert wird. Der Freiheitsgrad des Lösungsraumes des Modells ist somit enorm gross was bedeutet, dass ähnliche Resultate mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Sätzen von Parametern erzeugt werden können.

Es ist daher sinnvoll und nützlich, dass für das KAR-Modell eine systematische Untersuchung über den Einfluss der einzelnen Parameter auf das Gesamtergebnis durchgeführt werden konnte.

## 2 Die Sensitivitätsanalyse

Im KAR-Modell fliessen über 150 Grundlagedaten und Parameter in die Berechnung ein.

Zu den Grundlagedaten zählen beispielsweise die Angaben zum Gebäudevolumen aus den Bauabfallstudien des BAFU [bafu-hb], [bafu-tb]. Parameter sind alle Steuerungsgrössen des Modells wie z. B. der Anteil von Betonabbruch, der rezykliert wird oder der Anteil von Aushubmaterial, das zu Kies/Sand aufbereitet wird.

Für die Sensitivitätsanalyse wurden diese Grössen systematisch einzeln variiert und ihr jeweiliger Einfluss auf ein Referenzresultat festgehalten.

### 2.1 Aufbau

Für die Sensitivitätsanalyse wurde eine separate Steuerungsdatei in Excel erstellt. Diese enthält eine Liste mit allen Parametern, die verändert werden sollen. Zu jedem Parameter in dieser Liste ist angegeben, in welcher Datei, in welchem Excel-Sheet und in welcher Zelle er im KAR-Modell zu finden ist.

Für die Sensitivitätsanalyse kann diese Liste automatisiert abgearbeitet werden: Der erste Parameter wird im KAR-Modell gesucht, sein originaler Wert wird zwischengespeichert, dann wird sein Wert um  $x\%$  nach oben oder unten verändert. Danach wird das statische KAR-Modell mit dem veränderten Wert gerechnet und das entsprechende Resultat in die Steuerungsdatei geschrieben. Nun wird der originale Wert des Parameters zurückgesetzt und der nächste Parameter geholt.

Das ergibt für jeden Parameter zwei Resultate, eins aus der Veränderung nach oben und eins aus der Veränderung nach unten. Insgesamt kommen so über 300 Resultate zusammen.

Die Sensitivitätsanalyse wurde hauptsächlich für das statische KAR-Modell konzipiert, da das dynamische Modell auf dem statischen Modell aufbaut und sich ansonsten hauptsächlich an den Szenarien des BfS zur Entwicklung der Bevölkerung ('Bevölkerungsprognosen') orientiert.

### 2.1.1 Statisches Modell

Für die Sensitivitätsanalyse wurden über 150 Parameter um  $\pm 7.5\%$  variiert und die so modellierten Resultate mit einem 'Referenzresultat' verglichen. Der Wert von 7.5% wurde gewählt, weil damit die absoluten und relativen Änderungen in ähnlichen Grössenordnungen liegen. Diese Wahl ist somit arbiträr und könnte ebenso gut anders ausfallen.

Das Referenzresultat basiert auf dem KAR-Modell für die Schweiz mit Bezugsjahr 2010. Dieses Modell wurde um durchschnittliche Import und Exportflüsse ergänzt, so dass es von den Proportionen der Materialflüsse her einem 'typischen' Kanton entspricht. Das Referenzresultat ist somit das Produkt eines virtuellen, 'typischen' Modells.

**Bezugsgrösse** Das statische KAR-Modell berechnet 22 Materialflüsse simultan. Den Einfluss jedes Parameters auf jeden der 22 Materialflüsse zu untersuchen, wäre viel zu unübersichtlich. Für den Vergleich der einzelnen Resultate wurde daher die folgende Bezugsgrösse definiert: Die Summe der Abweichungen aller 22 modellierten Materialflüsse bezüglich den 22 Materialflüssen des Referenzresultats.

Das heisst, jeder der 22 Materialflüsse wird mit dem entsprechenden Wert des Referenzresultates verglichen, dessen Differenz genommen und die absoluten Differenzen aller 22 Materialflüsse werden zu einer Zahl summiert.

Die Bezugsgrösse ist also eine aggregierte Grösse. Im Hintergrund wird der Einfluss jedes Parameters auf jeden einzelnen Materialfluss berechnet und sein Wert dargestellt, so dass eine differenzierte Untersuchung bei Bedarf möglich ist.

Für die Analyse wurde diese Bezugsgrösse auf zwei unterschiedliche Werte berechnet und untersucht.

**Absolute Abweichung (Kubikmeter)** Die absolute Abweichung der Resultate wird in Kubikmeter ausgedrückt und gibt die Summe aller absoluten Abweichungen bezüglich dem Referenzresultat an. Diese Werte geben damit an, ob ein Parameter das Modellresultat in Kubikmetern stark beeinflusst.

**Relative Abweichung (Prozentual)** Die Summe der relativen Änderungen kann sich dann von den absoluten Änderungen unterscheiden, wenn kleine Mengen im Vergleich zum Referenzresultat stark schwanken, z.B. die Feinfraktion bei der Aufbereitung von Primärmaterial. In diesem Fall ist die relative Änderung der Feinfraktion gross, die absolute Änderung von grossen Materialflüssen wird jedoch nicht stark beeinflusst. Diese Information ist für die Analyse interessant, für die konkrete Modellierung jedoch weniger wichtig.

Die Stoffflussanalyse im KAR-Modell berechnet den Materialfluss 'Abbau Primärmaterial' in Abhängigkeit aller anderen Modellparameter, dieser Fluss kann nicht direkt verändert werden. Seine Werte fliessen aber in das Referenzresultat ein. Wenn also ein Parameter indirekten Einfluss auf den Abbau von Primärmaterial hat, wie beispielsweise die Neubaurate Hochbau, dann zeigt sich dieser Einfluss im Referenzresultat.

### 2.1.2 Dynamisches Modell

Beim dynamischen Modell wurden nur die Bevölkerungsentwicklung (Szenarien des BfS [bfs]) um 7.5% nach oben und nach unten verändert und das Ergebnis für das Jahr 2035 mit dem Resultat des BfS-Szenario 'Mittel' verglichen. Auch hier wurde die absolute Abweichung der Summe der Materialflüsse als Bezugsgrössen genommen.

## 2.2 Resultate

### 2.2.1 Resultat statisches Modell

Die über 150 Parameter, welche für die Sensitivitätsanalyse untersucht wurden, beeinflussen das Referenzresultat grösstenteils nur schwach. Ihr Einfluss 'verschmiert' im Modell, da die meisten modellierten Materialflüsse von mehreren Parametern gesteuert werden. Wenn nur eine einzelne Grösse variiert wird, hat das im Allgemeinen auf das gesamte Resultat nur einen geringen Einfluss.

Der Einfluss eines Parameters auf einen einzelnen der 22 Materialflüsse übersteigt in keinem Fall die Variation von  $\pm 7.5\%$ , das heisst kein Parameter wirkt sich überproportional auf das Modell aus. Dieser Befund wird nicht weiter diskutiert oder dargestellt. Er zeigt aber auf, dass das Modell insgesamt relativ robust bezüglich der Änderung von einzelnen Parametern ist.

Den grössten Einfluss auf das Modell hat die Variation des Parameters Neubaurate Tiefbau. Die Änderung bezüglich dem Referenzresultat beträgt hier maximal 2.26 % (bei einer Variation des Parameters um  $\pm 7.5\%$ ).

Die 10 Parameter mit dem stärksten absoluten Einfluss auf das KAR-Modell sind in der folgenden Tabelle 1 aufgelistet. Es werden nur die Resultate der absoluten Abweichungen dargestellt, da die stärksten relativen Änderungen denjenigen der absoluten Änderungen entsprechen (teilweise ändert sich die Reihenfolge etwas).

**Tabelle 1** Die 10 Parameter mit dem stärksten Einfluss auf das Resultat

Parameter verändert um 7.5 %	Änderung Resultat in Prozent*
Neubaurate Tiefbau	2.26 %
Neubaurate Wohnen	2.00 %
Neubaurate Nicht-Wohnen	1.42 %
Aushubanfall Nicht-Wohnen	0.82 %
Aushubanfall Wohnen	0.81 %
Aushubanfall Tiefbau	0.58 %
Erneuerungsrate Kies/Sand im Tiefbau	0.36 %
Aushubanfall bei Grossprojekten	0.31 %
Export von primären Baustoffen	0.26 %
Feinfraktion aus Aufbereitung Primärmaterial	0.22 %

\*Änderung Resultat in Prozent: Die Summe der Materialflüsse beträgt im Referenzresultat 187.7 Mio. m<sup>3</sup> (fest). Die Änderung eines Parameters beeinflusst diese Summe um den entsprechenden Wert in Prozent.

**Neubauraten** 'Neubau' generiert grosse Materialflüsse, da vollständige Gebäude und Infrastruktur neu erstellt werden. Die Neubauraten beziehen sich zudem prozentual auf den gesamten bisherigen Bestand (das BAUWERK). Eine kleine Änderung der Neubaurate hat darum eine grosse Änderung des absolut neugebauten Volumens zur Folge.

**Aushubanfall** Wenn neu gebaut wird, fällt ein grosses Volumen des Neubaus (Hoch- und Tiefbau) als Aushub an. Die Parameter 'Aushubanfall' bei Wohnen, Nicht-Wohnen und Tiefbau wirken sich daher im Modell direkt aus und machen die Resultate sensitiv auf diese Angaben.

**Erneuerungsrate Kies/Sand** Das Materiallager von Kies und Sand im Tiefbau ist gross. Die Erneuerungsrate gibt an, wieviel davon pro Jahr ersetzt wird, sie bezieht sich prozentual auf das bestehende Lager. Eine kleine relative Änderung dieser Rate resultiert in grossen absoluten Materialflüssen.

**Grossprojekte** Wie der Name sagt, sind Grossprojekte umfangreiche Bauvorhaben zusätzlich zur üblichen erwarteten Bautätigkeit. Sie beeinflussen das Resultat sehr direkt, da sie von keinen weiteren Parametern abhängen.

**Export primäre Baustoffe** Der Export von primären Baustoffen wirkt sich direkt auf den Abbau von Primärmaterial aus. Allerdings ist der Export von primären Baustoffen im Vergleich zum Eigenbedarf innerhalb des Systems üblicherweise nicht so hoch. Damit reagiert das gesamte Resultat nicht sehr sensitiv auf diesen Parameter, der Abbau von Primärmaterial hingegen sehr.

**Feinfraktion aus der Aufbereitung von Primärmaterial** Der Anfall der Feinfraktion bei der Aufbereitung von Primärmaterial beträgt üblicherweise weniger als 5 % des Rohmaterials. Da aber sehr viel Primärmaterial abgebaut und aufbereitet wird, resultiert daraus eine grosse Menge. Wenn daher der Parameter 'Anteil Feinfraktion' variiert wird, wird das Resultat entsprechend beeinflusst.

Der Materialfluss **Abbau Primärmaterial** wird im KAR-Modell nicht direkt über Parameter gesteuert, sondern in der Stoffflussanalyse in Abhängigkeit aller anderen Parameter berechnet. Darum erscheint in der Tabelle 1 kein Parameter, welcher diesen Fluss einzeln verändert.

### Grundlagedaten BAUWERK

Der Einfluss der Grundlagedaten – das Volumen und die Materialisierung des bestehenden BAUWERK (Hoch- und Tiefbau) beeinflusst die Modellresultate direkt: Wenn das Materiallager ungenau abgeschätzt wird, dann wird der Materialfluss, der sich auf dieses Lager bezieht, weniger genau der Realität entsprechen.

Die Inputdaten für das Modell werden sehr differenziert erhoben (36 Gruppen von Gebäuden nach Bauperiode und Nutzung, viele unterschiedliche Infrastruktursysteme, die alle einzeln abgeschätzt werden). Damit zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse hier nur einen geringen Einfluss von weniger als 2 % (bei variierten 7.5 %) auf die Resultate (Tabelle 2). Die Grundlagedaten aus den Studien [bafu-hb] und [bafu-tb] können somit gut in das KAR-Modell übernommen werden.

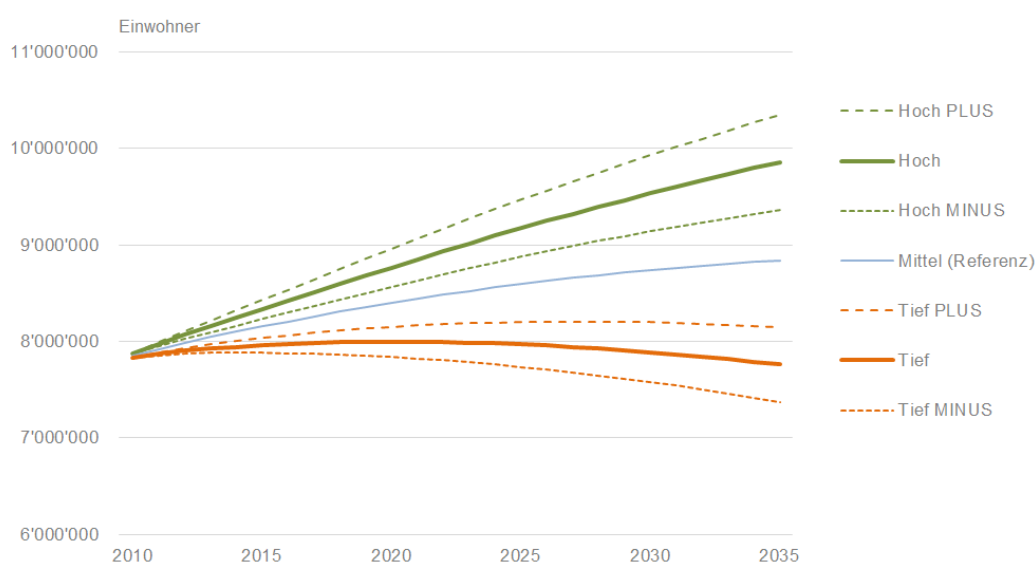
**Tabelle 2** Einfluss von ausgewählten Grundlagedaten auf das Resultat; MFH: Mehrfamiliengebäude

Grundlagedaten	Änderung Resultat in Prozent
Tiefbau Lager Kies/Sand (Tonnen)	1.55 %
MFH Anteil Beton am Gebäudevolumen	0.54 %
MFH Gebäudevolumen 1976-2000	0.39 %
Tiefbau Lager Belag (Tonnen)	0.37 %
MFH Gebäudevolumen 1961-1975	0.34 %

Die Materiallager der einzelnen Infrastrukturwerke im Tiefbau (Strassen, Schiene, Trinkwasser, Abwasser und Energie) werden für den Input in das KAR-Modell aggregiert (sie werden jedoch differenziert erhoben). Daher wirkt sich eine Veränderung dieser aggregierten Summe stärker aus, als eine einzelne Gebäudefraktion im Hochbau wie z.B. das Gebäudevolumen der Mehrfamilienhäuser mit Baujahr zwischen 1976 und 2000.

## 2.2.2 Resultat dynamisches Modell

Im dynamischen Modell wurden nur die Endpunkte der Bevölkerungsprognose um jeweils 7.5 % nach oben und nach unten verschoben und dazwischen ab 2010 linear interpoliert; alle anderen Parameter wurden auf dem Stand des Referenzresultats belassen (Figur 1). Für die Darstellung des Resultats beschränken wir uns auf die Werte der Jahre 2010 (hellblau, für alle Modell identisch) und die unterschiedlichen Resultate im Jahr 2035. Es werden nur die drei Materialflüsse des BAUWERK besprochen, das sind der Input von Baustoffen sowie der Output von Rückbaumaterial und Aushub.



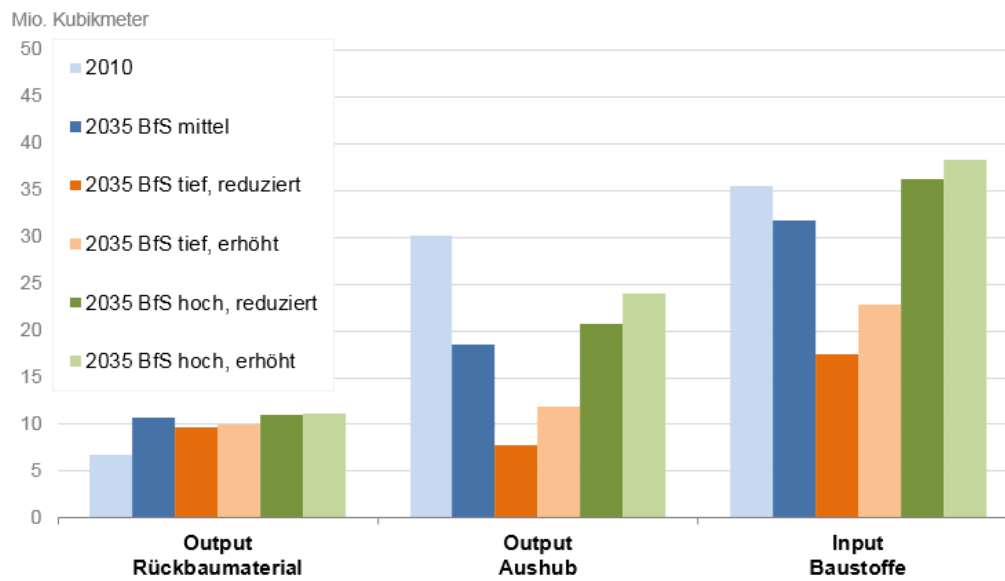
**Figur 1** Die zeitliche Entwicklung von 2010 bis 2035 der originalen und variierten BfS-Bevölkerungsszenarien für die Schweiz.

PLUS: Erhöhung des Endpunktes des Bevölkerungsszenario um 7.5%,  
 MINUS: Reduktion des Endpunktes des Bevölkerungsszenario um 7.5%.  
 Hoch, Mittel, Tief beziehen sich auf die BfS-Bevölkerungsszenarien.

Als Beispiel zeigt die folgende Figur 2 die drei Materialflüsse des BAUWERK (Input und Output) des Jahres 2035 direkt nebeneinander. Die hellblauen Säulen entsprechen den Resultaten für das Jahr 2010, diese sind für alle Simulationen identisch und darum nur einmal aufgetragen. Die dunkelblauen Säulen sind die Referenzresultate nach dem Bevölkerungsszenario BfS 'mittel' für das Jahr 2035. Die Differenz hellblau zu dunkelblau zeigt die Standardentwicklung der einzelnen Materialflüsse 2010–2035 und dient als Referenz.

Die rötlichen Säulen zeigen die Resultate von 2035, wenn das Bevölkerungsszenario BfS 'tief' reduziert (dunkel) bzw. erhöht (hell) wird. Analog entsprechen die grünen Säulen den Resultaten des Bevölkerungsszenario BfS 'hoch', das reduziert (dunkel) und erhöht (hell) wird.

Die Unterschiede innerhalb der einzelnen Szenarien auf Grund der 7.5%-Variation sind geringer als die Unterschiede zwischen den BfS-Bevölkerungsszenarien. Oder, anders formuliert, die Resultate eines variierten BfS-Szenarios sind ähnlicher als die Resultate von verschiedenen BfS-Szenarien ('rot bleibt rot, grün bleibt grün'). Das bedeutet, dass für die Analyse und Modellierung der KAR-Szenarien die Wahl der BfS-Bevölkerungsszenarien wichtiger ist als deren genaue Werte bzw. Entwicklung.



**Figur 2** Der Vergleich der drei Materialflüsse des BAUWERK bei variierten BfS-Bevölkerungsszenarien. Erläuterung im Text.

Analog könnten für jeden der 22 Materialflüsse die Resultate dargestellt werden, die Aussage bleibt aber die gleiche.



### 3 Fazit

Die systematische Sensitivitätsanalyse für das KAR-Modell vom Stand 2015 hat gezeigt, dass der Einfluss einzelner Parameter auf die Summe der Materialflüsse relativ gering und in keinem Fall überproportional ist.

Wenn ein Parameter um  $\pm 7.5\%$  erhöht wird, so verändert sich keiner der 22 Materialflüsse um mehr als 7.5%. Dieser Befund ist beruhigend – das KAR-Modell verhält sich relativ robust gegenüber einer Veränderung der Parameter und wird auch nicht von einem einzigen Parameter 'dominiert'.

Gleichzeitig zeigt die Sensitivitätsanalyse aber auch auf, dass das Modellieren eines KAR-Systems viel Sachkenntnis für die sinnvolle Wahl der einzelnen Parameter benötigt. Gerade weil der Einfluss von einzelnen Parametern relativ gering ist, muss das Zusammenspiel für die Kalibration eines Systems sorgfältig abgestimmt sein. Und diese Abstimmung erfordert neben grosser Erfahrung jedes Mal viel Aufwand.

#### Quellen

[bafu-hb] BAFU, 2008 und 2014. *Bauabfallstudie Hochbau*.  
Wüest & Partner im Auftrag des BAFU

[bafu-tb] BAFU, 2008 und 2014. *Bauabfallstudie Tiefbau*.  
Energie- und Ressourcen-Management GmbH im Auftrag des BAFU

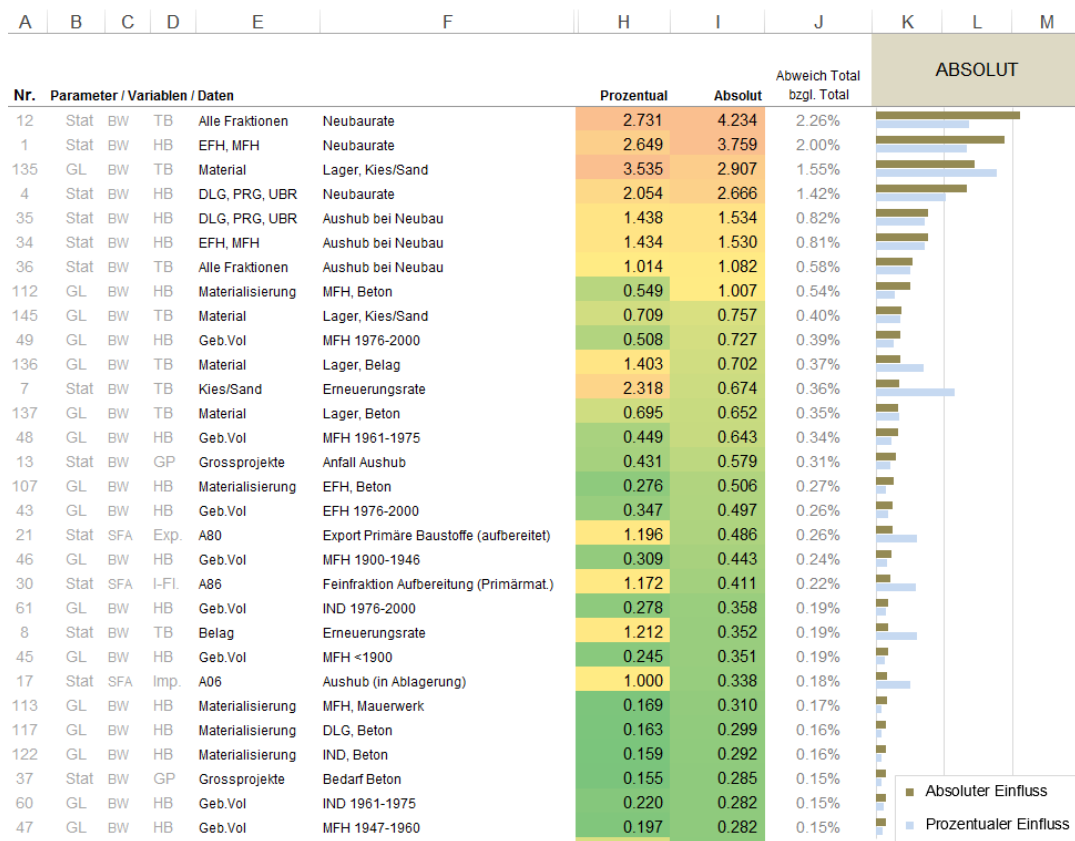
[bfs] BfS Bevölkerungsszenarien

[http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/01/03/blank/key\\_kant/01.html](http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/01/03/blank/key_kant/01.html)

## Anhang

### Resultate des statischen Modells, sortiert nach absoluter Abweichung

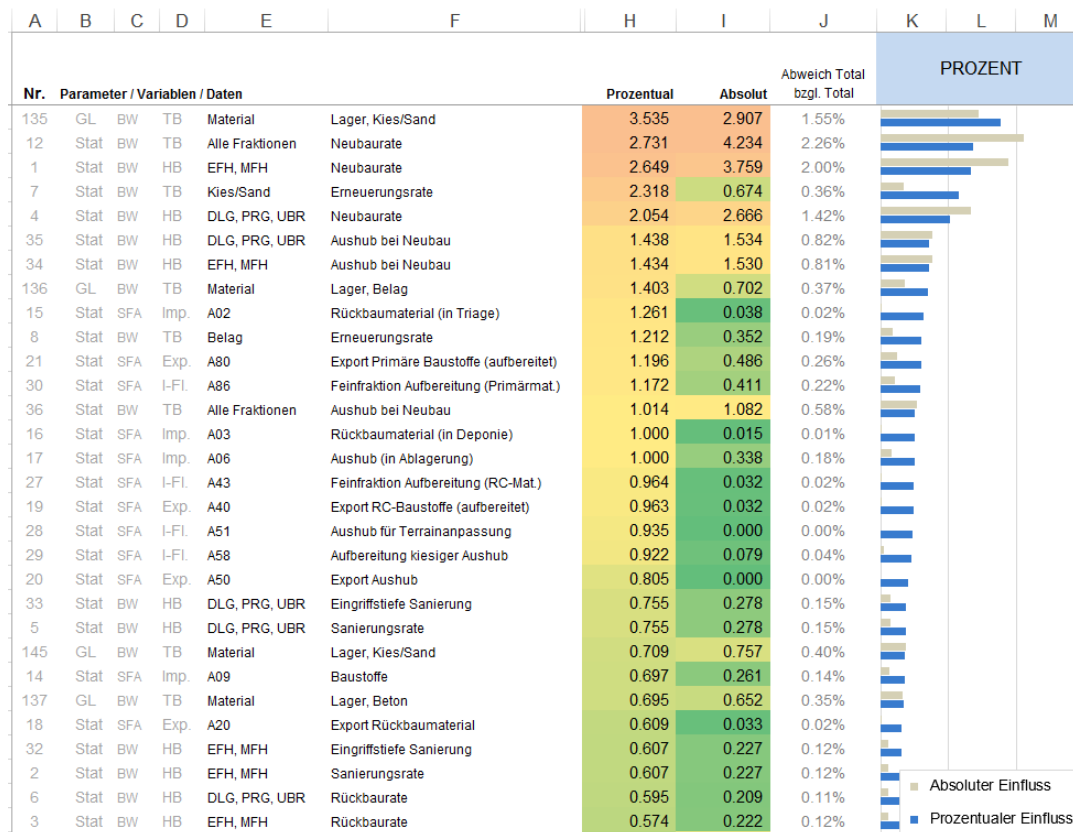
Es sind nur die 30 Parameter mit dem grössten Einfluss auf das Resultat dargestellt.



**Figur 3** Resultate des statischen Modells, sortiert nach absoluter Abweichung (braune Balken im Diagramm)

**Resultate des statischen Modells, sortiert nach prozentualer Abweichung**

Es sind nur die 30 Parameter mit dem grössten Einfluss auf das Resultat dargestellt.



**Figur 4** Resultate des statischen Modells, sortiert nach prozentualer Abweichung (blaue Balken im Diagramm)