

Detaillierte Verfahrensbeschreibung, Datengrundlage und Ergebnisse

REM-NUT®



Inhaltsverzeichnis

1	REM-NUT®	5
1.1	Grundlagen allgemein	5
1.1.1	Prozessskizze REM-NUT® Verfahren	5
1.1.2	Prozessskizze als STAN Modell.....	6
1.1.3	Verfahrensbeschreibung	7
1.1.4	Betriebsparameter REM-NUT® ®.....	9
1.2	Datengrundlage für Bewertung.....	9
1.2.1	Sachbilanz	9
1.2.2	Stoffflussanalyse.....	9
1.2.3	Charakteristik Endprodukt	10
1.2.4	Umsetzung.....	11
1.2.5	Flächenbedarf auf Kläranlage	12
1.2.6	Ökonomische Grundlagen.....	12
1.3	Ergebnis REM-NUT® Verfahren	13
1.3.1	Technologie Bewertung	13
1.3.2	Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)	13
1.3.3	Ergebnisse ganzheitliche Bewertung REM-NUT®.....	18
1.3.4	Ökonomische Bewertung	22
1.3.5	Literatur.....	28
1.4	Anhang	29
1.4.1	Stoffflussanalyse REM-NUT®	29
1.4.2	Stoffflussanalyse Gesamtprozess REM-NUT®.....	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links: schematischer Aufbau Ionentauscher, rechts: Spezifischer Aufbau REM-NUT® Verfahren.....	5
Abbildung 2: STAN Modell REM-NUT® inkl. MAP Aufbereitung	6
Abbildung 3: STAN Modell REM-NUT® gesamte Prozesskette	6
Abbildung 4: Schema Ionenaustauscher REM-NUT®	7
Abbildung 5: Adsorption von P und Regeneration des Harzes	8
Abbildung 6: P-Entfernungsraten	10
Abbildung 7: REM-NUT® Endprodukt.....	11
Abbildung 8: Pilotanlage Grottaglie-Monteiasi, Italien (100.000 EW) REM-NUT® Verfahren	12
Abbildung 9: P-Stoffflussanalyse REM-NUT®	14
Abbildung 10: Einfluss REM-NUT® auf P-Emission Gewässer und P-Fracht Klärschlamm (2 signifikante Stellen)	14
Abbildung 11: Einfluss REM-NUT® auf das Gesamtsystem.....	15
Abbildung 14: Ergebnis Güterflussanalyse REM-NUT®.....	16
Abbildung 15: CO ₂ bzw. SO ₂ -Äquivalente [kg bzw. g/kg P _{rückg.}] REM-NUT®	17
Abbildung 14: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren).....	18

Abbildung 16: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation	20
Abbildung 17: P-und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (REM-NUT®).....	20
Abbildung 17: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung REM-NUT® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP).....	21
Abbildung 19: Upscaling Faktoren Investitionskosten REM-NUT®	23
Abbildung 18: Produktspezifische Kosten REM-NUT®; Variation Datengrundlage	25
Abbildung 19: Kostenaufgliederung REM-NUT® 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts)	26
Abbildung 20: Sensitivitätsanalyse REM-NUT®	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter REM-NUT® Verfahren	9
Tabelle 2: Ressourcenbedarf REM-NUT®	9
Tabelle 3: Nährstoff-, (Schwer-)metallgehalte und org. Spurenstoffe REM-NUT® Endprodukt	10
Tabelle 4: Bakteriologische Untersuchung REM-NUT® Endprodukt.....	11
Tabelle 5: Löslichkeit in % bezogen auf Pges (REM-NUT®).....	11
Tabelle 6: Umsetzungen REM-NUT® Verfahren	12
Tabelle 7: Flächenbedarf REM-NUT®Verfahren	12
Tabelle 8: Datengrundlage REM-NUT®.....	12
Tabelle 9: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential REM-NUT®.....	13
Tabelle 10: Einsparungen Abwasserreinigung.....	14
Tabelle 12: Ressourcenbedarf Harze und Chemikalien zur Reinigung bzw. Neubeladung Ionentauscher.....	15
Tabelle 13: Ressourcenbedarf REM-NUT® und molare Masse Fällmittel.....	16
Tabelle 14: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf REM-NUT®	16
Tabelle 14: Spezifischer Energiebedarf REM-NUT®.....	16
Tabelle 15: Indirekte SM-Emissionen REM-NUT®	18
Tabelle 16: Kumulierter Energieaufwand REM-NUT®.....	18
Tabelle 17: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung REM-NUT®	18
Tabelle 18: Transportwege REM-NUT®	19
Tabelle 19: CO ₂ bzw. SO ₂ -Äquivalente Prozesskette REM-NUT®.....	19
Tabelle 20: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette	19
Tabelle 21: Direkte Emissionen REM-NUT® Prozesskette, Vergleich Referenz.....	21
Tabelle 22: Bewertung MAP REM-NUT®	22
<i>Tabelle 23: Entwicklung Investitionskosten in Abhängigkeit des Anlagenausbaus</i>	<i>23</i>
Tabelle 24: Jahreskosten (gerundet) REM-NUT® (Referenzkläranlage 100.000 EW)	24
Tabelle 25: Einsparungen und Erlöse (gerundet) REM-NUT® (Referenzkläranlage 100.000 EW)	24
Tabelle 26: Spezifische Kosten REM-NUT® (100.000 EW)	24
Tabelle 27: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße.....	26
Tabelle 28: Jahreskosten gesamte Prozesskette REM-NUT® (Datengrundlage Pilotanlage).....	27
Tabelle 29: Jahreskosten gesamte Prozesskette REM-NUT® (Datengrundlage großtechnische Umsetzung)	27



1 REM-NUT®

1.1 Grundlagen allgemein

REM-NUT® (**REMu**val-**NUT**rients) ist ein an der Polytechnischen Universität von Bari entwickeltes Verfahren zur P-Rückgewinnung aus dem Ablauf einer Kläranlage (Liberti et al., 1986a, b, c; Liberti et al., 2001; Petruzzelli, 2003; Blaney et al., 2007). Grundlage für eine hohe Rückgewinnungsquote ist der Verzicht auf gezielte Phosphorelimination in der mechanisch-biologischen Stufe. Eine P-Elimination aufgrund des Bakterienwachstums für den CSB-Abbau von 30 - 40 % wird angenommen. Das Schlammwasser ist eine weitere nutzbare Phosphor-Quelle für dieses Verfahren. Ziel ist die simultane Rückgewinnung von Phosphor, Ammonium und Kalium mit kathodischen und anionischen Ionenaustauschern. Als Kationenaustauscher wird Zeolit und ein starkes Basisharz als Anionenaustauscher eingesetzt. Das Verfahren wird in die Prozesse Ionenaustauscher, Fällreaktor und Filterbeutel unterteilt. Als Endprodukte fallen nahezu schadstofffreie Struvite (MgNH_4PO_4 und KHNH_4PO_4) an. Das Verfahren wurde bereits als Pilotanlage umgesetzt, eine großtechnische Umsetzung scheiterte primär an der schlechten Selektivität von Phosphat Ionen am Anionenaustauscher und sekundär an der technisch-wirtschaftlichen Ineffizienz. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf kann eine Rückgewinnungsquote von max. 55 % erzielt werden.

1.1.1 Prozessskizze REM-NUT® Verfahren

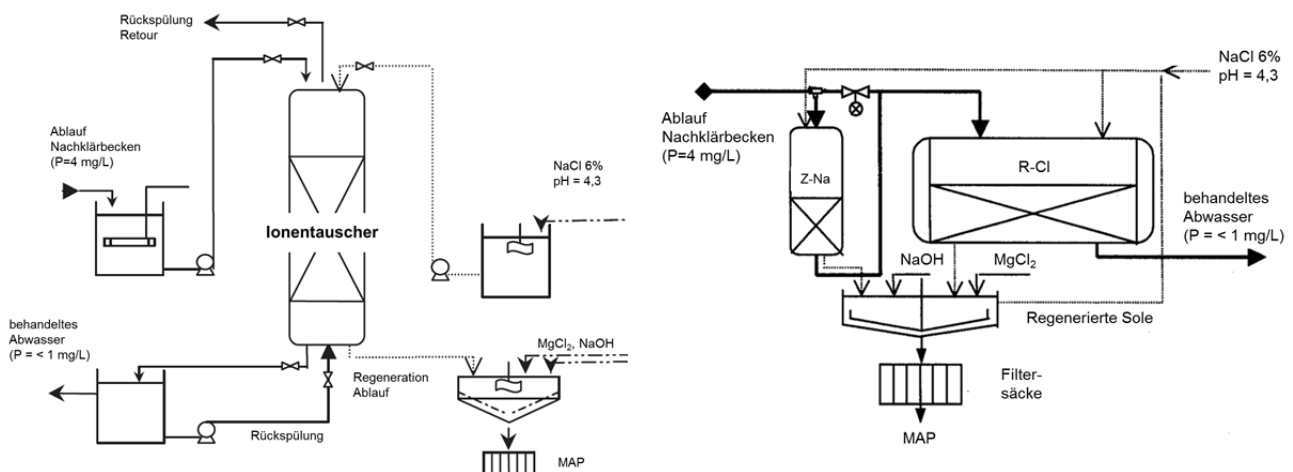


Abbildung 1: Links: schematischer Aufbau Ionentauscher, rechts: Spezifischer Aufbau REM-NUT® Verfahren

1.1.2 Prozessskizze als STAN Modell

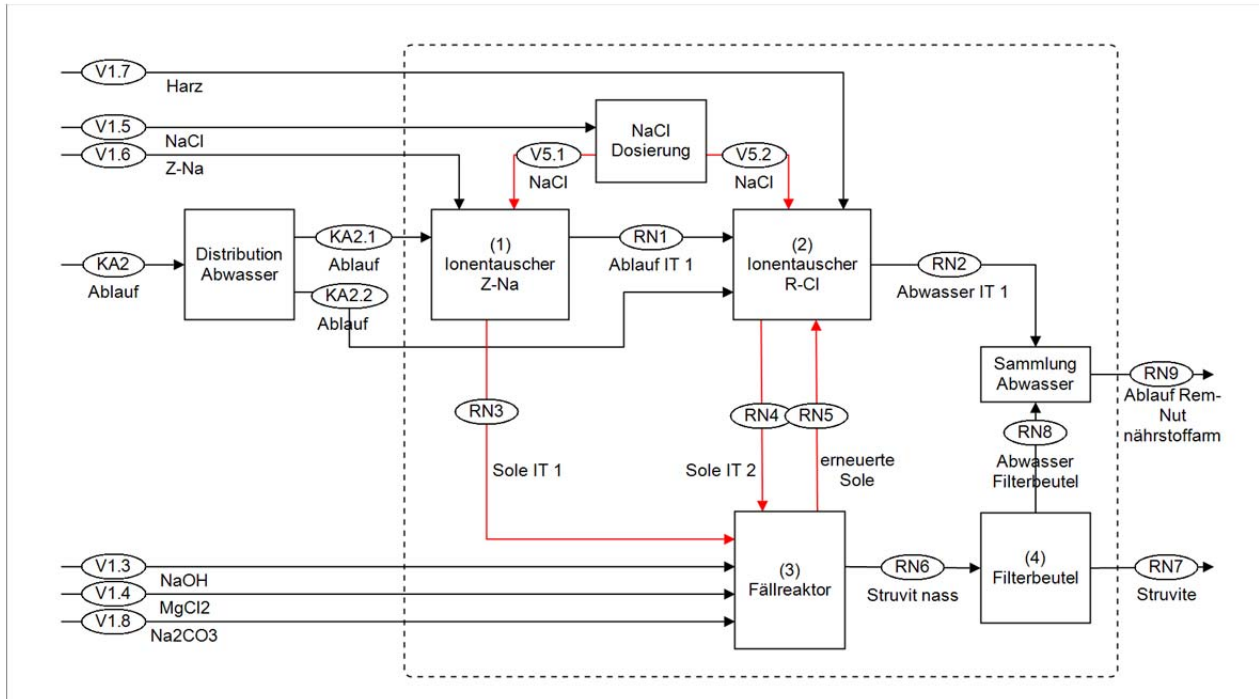


Abbildung 2: STAN Modell REM-NUT® inkl. MAP Aufbereitung

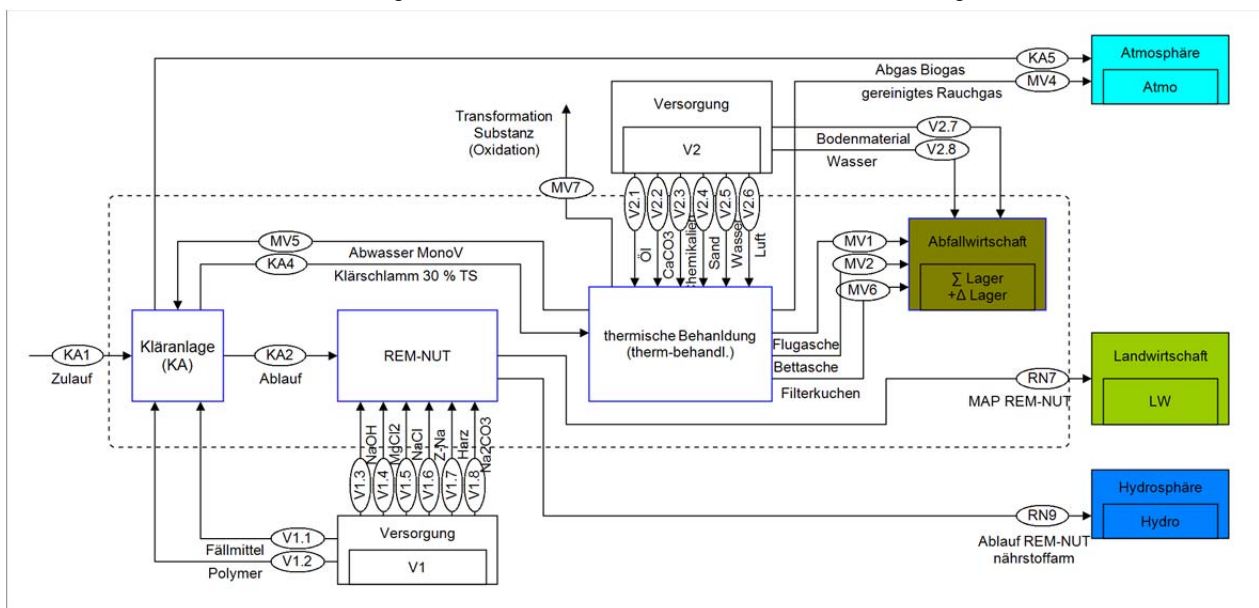
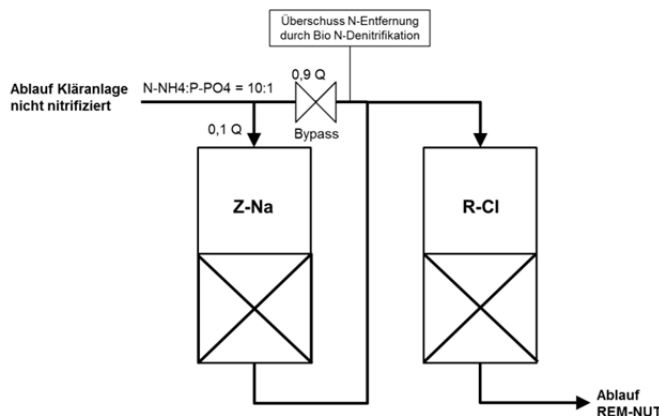


Abbildung 3: STAN Modell REM-NUT® gesamte Prozesskette



1.1.3 Verfahrensbeschreibung

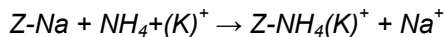


Das REM-NUT® Verfahren setzt sich aus zwei Ionenaustauschern zusammen. Aufgrund des unvorteilhaften N:P Verhältnisses des nicht nitrifizierten Abwassers von 10:1 wird nur ein Zehntel des Ablaufs durch den ersten Ionentauscher geleitet. Über einen Bypass wird 90 % des Ablaufs weitergeleitet, biologisch denitrifiziert und in den zweiten Ionenaustauscher geleitet. Der behandelte Ablauf des ersten Tauschers wird ebenfalls in den zweiten Tauscher geführt.

Abbildung 4: Schema Ionenaustauscher REM-NUT®

Ionenaustauscher Z-Na [1]

Der Kationenaustauscher basiert auf natürlichen Zeoliten. Über folgende Reaktion wird Natrium durch Ammonium und/oder Kalium aus dem Abwasser ersetzt.

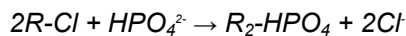


Formel 1

Nachdem der Ablauf den Ionentauscher passiert hat muss dieser gereinigt bzw. neu beladen werden. Dazu wird Natriumchlorid (NaCl 0,6 M) eingesetzt. Das Reinigungseluat gelangt zusammen mit dem Eluat aus dem zweiten Ionenaustauscher in den Fällreaktor.

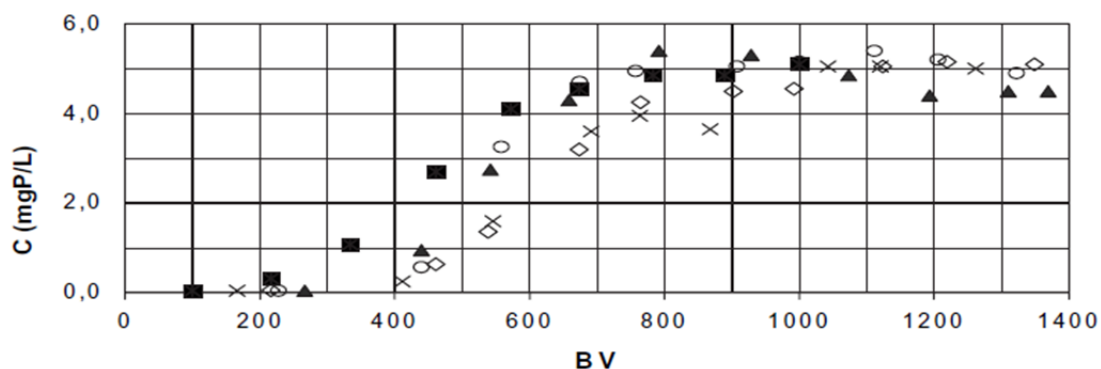
Ionenaustauscher R-Cl [2]

Im zweiten Ionenaustauscher, bestehend aus einem Harz, ersetzt das im Ablauf enthaltene Hydrogenphosphat (HPO_4^{2-}) das Anion Chlorid.



Formel 2

Neben den Nährstoffen werden „ungewollt“ Feststoffe, Phenol-Derivate, Tenside, Stoffe mit endokriner Wirkung, Östrogene, bio-persistente refraktäre Stoffe und Mikroorganismen im Ionenaustauscher festgehalten. Nachteil ist eine mit der Zeit zunehmende Belegung der Tauscher und Abnahme der Leistung, da diese Stoffe mit der Reinigung nicht entfernt werden. Versuche von Petruzzelli et al. (2001) zeigen die Adsorption von Phosphor in Abhängigkeit des Bettvolumens des Harzes. Das Bettvolumen wird definiert als das von der Harzschüttung in der Säule des Ionenaustauschers eingenommene Volumen (Höhe der Schüttung multipliziert mit dem Innendurchmesser). Die Ausgangskonzentration (C) an Phosphor der in Abbildung 5 dargestellten Versuche liegt bei 4,4 mg P/L. Bis zu einem Bettvolumen von rund 400 wird jene Fracht an Phosphor entfernt, damit die Konzentration von 1 mg P/L nicht überschritten wird. Durch den Regenerationsvorganges (Zugabe von NaCl, BV ~2 - 3) kann eine fast 100 %ige Rücklösung erreicht und das Harz regeneriert werden.



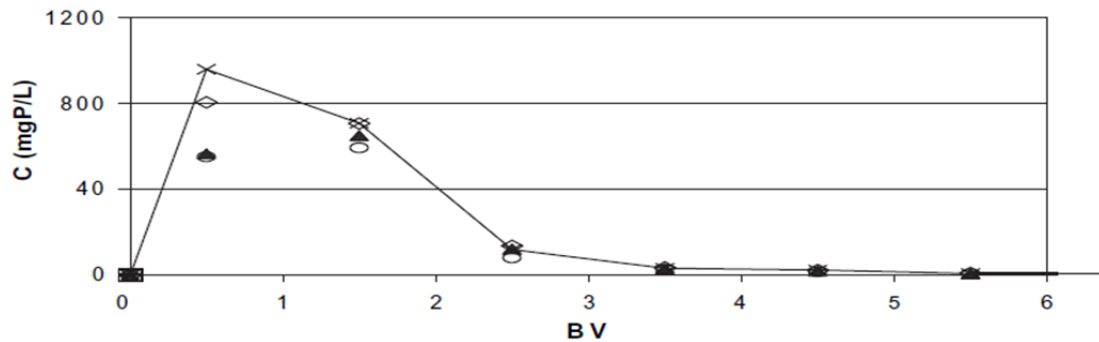
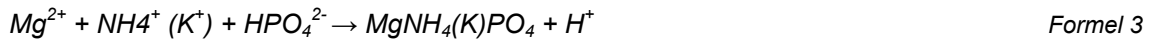


Abbildung 5: Adsorption von P und Regeneration des Harzes

Fällreaktor [3]

In den Reinigungseluaten der beiden Ionentauscher liegen die Nährstoffe konzentriert vor. Sie werden gut vermischt, ein pH Wert von 9,5 eingestellt und Magnesiumsalze ($MgCl_2$) zugegeben. Durch die pH-Wert Anhebung werden unerwünschte ausgetauschte Schwermetalle gefällt. Magnesium reagiert mit Ammonium bzw. Kalium und Hydrogenphosphat zu Struvit (MAP, KAP)



Filterbeutel [4]

Im Filterbeutel erfolgt die Abtrennung des gefällten Endproduktes von der flüssigen Phase. Der Überstand wird der Kläranlage zugeführt, Struvit kann direkt in der Landwirtschaft oder in der chemischen Industrie eingesetzt werden.

Mögliche Betriebsprobleme REM-NUT®

Verfahren die im Ablauf einer Kläranlage ansetzen, übernehmen die letzte Stufe der P-Entfernung aus dem Abwasser. Das bedeutet, ein störungsfreier Betrieb ist Grundvoraussetzung für eine zuverlässige Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte ist. Praktische Versuchen, unter anderem in Abbildung 6 dargestellt, zeigen, dass z.B. die vorgegebenen Grenzwerte von 1 mg P/L oftmals überschritten werden. Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus den stark variierenden Volumenströmen. Während im Schlammwasser und Klärschlamm über die Zeit ähnliche Volumenströme beobachtet werden, können im Ablauf innerhalb kurzer Intervalle starke Schwankungen auftreten, die beim Bau und Betrieb des Verfahrens berücksichtigt werden müssen.

NaCl wird als Regenerationsmittel der Ionenaustauscher eingesetzt. Nicht unwahrscheinlich ist eine überdimensionierte Beschickung der Tauscher und damit erhöhte Cl^- Frachten im Fällreaktor. Zusätzlich wird Cl^- über das Fällmittel $MgCl_2$ zugegeben. Nicht auszuschließen ist daher eine erhöhte Salzfracht im Ablauf des REM-NUT® Prozesses.

Trotz langer Versuchszeiträume mit der Pilotanlage und guter Ergebnisse wurde dieses Verfahren eingestellt. Gründe sind die

- geringe P-Selektivität der eingesetzten Ionenaustauscharze
- ineffiziente Regeneration der Ionenaustauscharze und
- der Verlust an Adsorptionskapazität infolge der irreversiblen Adsorption von unerwünschten Stoffen wie z.B. bio-persistenter und organischer Stoffe.

Vorteile des Verfahrens sind die sehr geringen Schwermetall- und organischen Spurenstoffgehalte sowie eine hygienische Unbedenklichkeit des Endprodukts. Neu entwickelte und bereits untersuchte selektive Ionenaustauscher bieten eine deutlich verbesserte Adsorption des Phosphors und eine verbesserte Regeneration des Ionentauschers Blaney et al. (2007) , Hoffmann und Homa (2011)



1.1.4 Betriebsparameter REM-NUT®

Parameter	von
pH-Fällung	9,5
Mg:P	1
N:P	100
Reaktionsdauer (min)	60

Tabelle 1: Optimale Betriebsparameter REM-NUT® Verfahren

1.2 Datengrundlage für Bewertung

1.2.1 Sachbilanz

Benötigte Chemikalien wie Natronlauge (NaOH), Natriumchlorid (NaCl) und Natriumcarbonat (Na_2CO_3) sowie der anfängliche Harzbedarf und jährliche Harzbedarf zur Erneuerung können nur anhand detaillierter Kostenkalkulationen der großtechnisch umgesetzten Anlagen erhoben und auf die rückgewinnbare P-Fracht bezogen werden (o). Folgender Ressourcenbedarf wird dabei angenommen.

Extraktionsmittel	Bedarf pro kg P rückg.
NaOH	4,2
NaCl	11,3
Na_2CO_3	0,7
Harz (Beginn)	1,4
Harz (Erneuerung)	0,07

Tabelle 2: Ressourcenbedarf REM-NUT®

Der jährliche Energiebedarf für eine 100.000 EW Anlage liegt im Bereich von 180.000 – 280.000 kWh. Der hohe Schwankungsbereich ergibt sich aus der Datengrundlage für eine Pilot- und eine großtechnisch umgesetzte Anlage.

1.2.2 Stoffflussanalyse

Anmerkung: Die Transferkoeffizienten der Schwermetalle für jeden einzelnen Prozess können nicht ermittelt werden. Bekannt ist, dass nur ein geringer Anteil der Schwermetalle im Ionentauscher fixiert bzw. adsorbiert wird. Für alle Metalle wird daher ein TK zur Fällung von 5 angenommen. Der TK für die Fällung wird dann aus den Frachten der Ionentauscher und den zu erwartenden Frachten im Endprodukt (MAP Anfall Referenzkläranlage und Konzentration im Endprodukt aus Literatur) festgelegt. Aufgrund dieser Koeffizientenermittlung wird eine hohe Unsicherheit angenommen.

Transferkoeffizient (TK) Ionenaustauscher (1+2)

Der Transferkoeffizient für Phosphor kann aus Abbildung 4 entnommen werden. Die Elimination von P ist abhängig von der Zulaufkonzentration und der Erschöpfung des Tauschmaterials. Die Elimination schwankt zwischen 60 und 100 % (+). Bis zur Erschöpfung des Ionentauschers kann im Durchschnitt rund 90 % des Phosphors eliminiert werden (Liberti et al., 1986a). Ammonium kann zu 80 % über die Ionentauscher aus dem Abwasser entfernt werden (+).

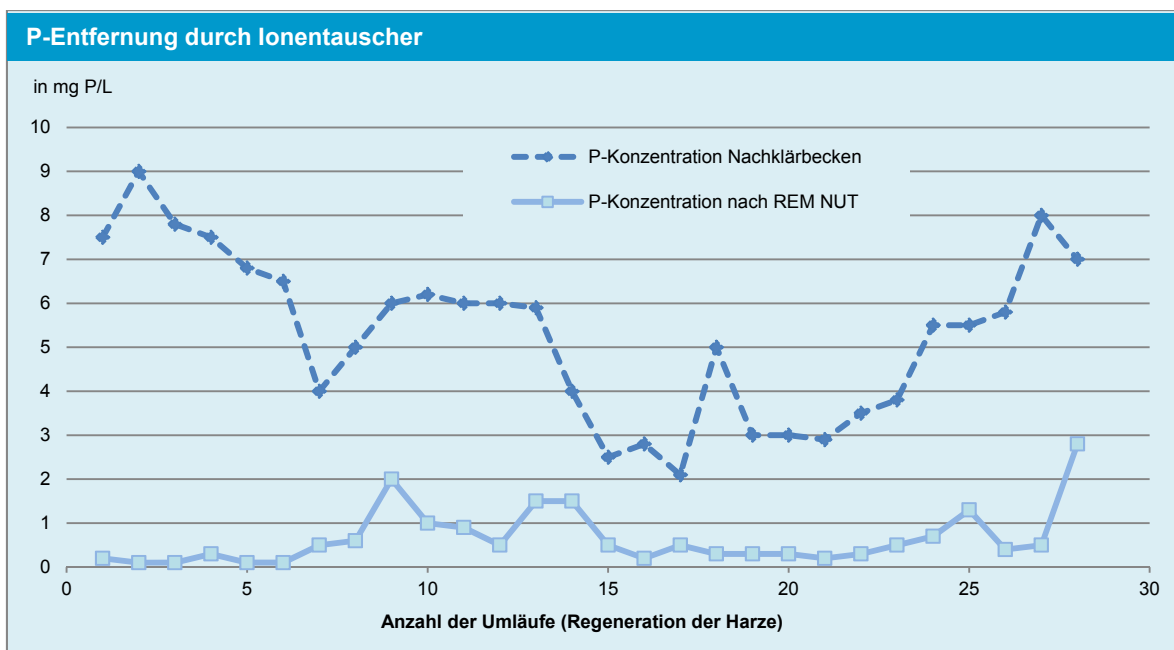


Abbildung 6: P-Entfernungsdaten

1.2.3 Charakteristik Endprodukt

1.2.3.1 Nährstoffe, (Schwer)-metalle und org. Spurenstoffe

Für die Fällung im Reaktor werden Magnesiumsalze $MgCl_2$ zugegeben. Neben Magnesiumammoniumphosphaten werden zudem auch Magnesiumkaliumphosphate $MgNH_4(K)PO_4 + 6H_2O$ mit einem Wassergehalt von ~30 % und einem organischen Anteil von ca. 15 % gebildet. Die Einbindung des Kaliums resultiert aus simultanen Adsorption des Kaliums (K^+) in den Ionentauschern. Das Nährstoffverhältnis des Endproduktes P:N:Mg liegt bei 11,5:5:9 (+). Es handelt sich dabei um ein sehr reines Endprodukt mit Phosphorgehalten des Endprodukts liegt im Bereich von 11 - 12 % (+). Die Schwermetallgehalte sind äußerst niedrig und liegen durchwegs unter der Nachweisgrenze. Die Anforderungen der Düngemittelverordnung werden mit diesem Produkt eindeutig erfüllt (++). Zusätzlich zu den genannten Schwermetallen wurde das Endprodukt auf radioaktive Inhalte untersucht. Radioaktive Stoffe konnten nicht nachgewiesen werden (+).

	Nährstoffe [g/kg TS]	Schwermetalle [mg/kg TS]	Org. Spurenstoffe [mg/kg TS]
P	110-120	As <3	AOX -
N	50	Cd <0,5	PAK -
Mg	100	Cr <0,35	PCDD/F -
Ca	67	Cu <0,2-2	
K	-	Hg <0,5	
Metalle [mg/kg TS]		Ni <4,5	
Al	-	Pb <2-4,	
Fe	190	Zn <25	

Tabelle 3: Nährstoff-, (Schwer)-metallgehalte und org. Spurenstoffe REM-NUT® Endprodukt

Bakteriologische Untersuchungen von Liberti et al. (1986) zeigen keine Belastung des Endproduktes mit fäkalen Bakterien (++). Eine spätere Untersuchungen (Liberti et al., 2001) bescheinigt, dass das Endprodukt nahezu steril ist, weshalb keine hygienischen Bedenken anzunehmen sind (++).



Bakteriologische Untersuchung	Wahrscheinlich Anzahl/100 ml
Total Coliforme	33
Fäkale Coliforme	nicht vorhanden
Total Streptokokken	nicht vorhanden
Fäkale Streptokokken	nicht vorhanden

Tabelle 4: Bakteriologische Untersuchung REM-NUT® Endprodukt

1.2.3.2 P-Löslichkeit

Für das REM-NUT® Endprodukt liegen keine Daten hinsichtlich der Löslichkeit vor. Allerdings handelt es sich dabei um ein sehr reines Magnesiumammoniumphosphat (MAP, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Dieses Düngemittel weist eine geringe Wasserlöslichkeit (1 – 5 %) und eine 100 %ige Zitronenlöslichkeit auf. In Topfversuchen kann eine vollständige Aufnahme über die Pflanzen nachgewiesen werden (o)

Extraktionsmittel	Löslichkeit [%]
Wasser	<5
Zitronensäure	100
Ameisensäure	-
Mineralsäure	-
Ammoncitrat	-

Tabelle 5: Löslichkeit in % bezogen auf Pges (REM-NUT®)

1.2.3.3 Eignung als Sekundärdünger

Bei der Fällung entsteht ein pulverförmiges bzw. ein Endprodukt mit grober Körnung. Eine Lagerung ist ohne weitere Behandlung problemlos möglich, eine direkte Aufbringung mit modernem landwirtschaftlichem Gerät ist jedoch aufgrund der Körnung nicht möglich.



Abbildung 7: REM-NUT® Endprodukt

1.2.3.4 Zu berücksichtigende Abfallstoffe aus REM-NUT®R® Verfahren

Als Abfallstoff fallen die Harze des Ionentauschers an, die nicht mehr regeneriert werden können. Durch den Ionentauscher werden wie bereits erwähnt „ungewollt“ Feststoffe, sowie organische Spurenstoffe wie Phenol-Derivate, Tenside, Stoffe mit endokriner Wirkung, Östrogene, bio-persistente refraktäre Stoffe und Mikroorganismen festgehalten. Eine thermische Behandlung der anfallenden Harze ist naheliegend.

1.2.4 Umsetzung

Das REM-NUT® Verfahren wurde in den 80er Jahren auf der Kläranlage Grottaglie-Monteiasi (Pilotanlage, 100.000 EW) und auf der Kläranlage West Bari (Großtechnisch, 200.000 EW) umgesetzt. Im Falle der großtechnischen Umsetzung konnten jährlich rund 555 kg TS MAP erzeugt werden (+).

Umsetzung	
Grottaglie-Monteiasi (I)	Pilotanlage (100.000 EW)
West Bari (I)	Großtechnisch (200.000 EW)

Tabelle 6: Umsetzungen REM-NUT® Verfahren

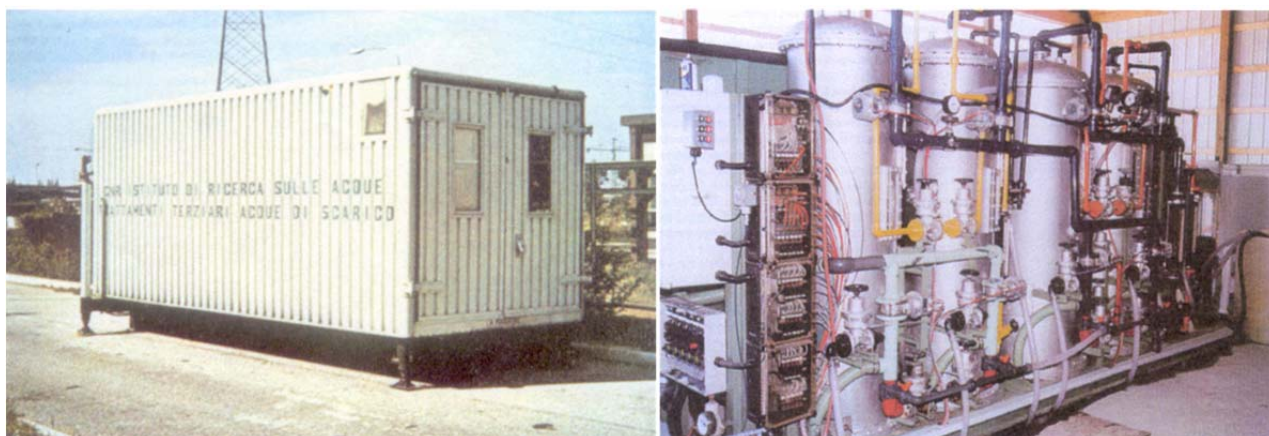


Abbildung 8: Pilotanlage Grottaglie-Monteiasi, Italien (100.000 EW) REM-NUT® Verfahren

1.2.5 Flächenbedarf auf Kläranlage

Der Flächenbedarf errechnet sich aus der Station mit den Ionenaustauschern (Standard 20 Fuß Container), dem MAP Reaktor und der Sackfiltervorrichtung. Das MAP-Reaktorvolumen wird auf benötigte Menge an Regenerationsflüssigkeit bemessen. Im Vergleich zu einem Reaktor, der für das Schlammwasservolumen nötig ist, kann dieser deutlich kleiner ausgeführt werden. Die Größe der Beutelfilteranlage orientiert sich an jener aus dem PRISA Verfahren. Das Maschinenhaus sollte genügend Platz für Fällmittel- und Basenlager, Umwälzpumpe, Schlammwasserpumpe, Pumpen, Feststofffilter, Beutelfilteranlage und Container bieten. Der Platzbedarf ist aus Tabelle 7 zu entnehmen (o).

Anlagenteile	Flächenbedarf
1 Ionentauscher Neuerrichtung	15 m ²
Maschinenhaus	200 m ²

Tabelle 7: Flächenbedarf REM-NUT®Verfahren

1.2.6 Ökonomische Grundlagen

Zu beiden praktischen Umsetzungen liegen Daten für die ökonomische Bewertung vor (Liberti et al., 1986a; Liberti et al., 1986b). Die Daten zeigen, dass von der Weiterentwicklung einer Pilotanlage auf eine großtechnische Anlage vor allem die Kosten für Chemikalien überproportional um den Faktor 9 ansteigen. Auf Basis der vorliegenden Daten ist der Grund für diesen Anstieg nicht nachvollziehbar. Eine genaue Aufschlüsselung des Chemikalienbedarfs ist für die Anlage in West Bari nicht möglich. Aufgrund der unterschiedlichen Datengrundlage wird eine ökonomische Bewertung auf Basis der beiden Datensätzen durchgeführt. Nach Angaben von Liberti et al. (1986) kann für das MAP ein Verkaufspreis von 500 – 850 €/t erzielt werden. In den seinen Berechnungen wird jedoch mit einem Erlös von 300 €/t kalkuliert.

Kostenstellen	Grottaglie-Monteiasi [100.000 EW]	West-Bari [200.000 EW]
Investitionskosten	440.000	950.000
Nutzungsdauer Ionentauscher	10-15 Jahre	10-15 Jahre
Anteil Bautechnik	63 %	46 %
Harz Inventar	144.000	185.000
Harz-Back up (€/a)	7.200	13.000
Chemikalien	173.000	1.600.000
Personal (MA/a)	1,25	2
Energie (€/a)	18.000	113.000

Tabelle 8: Datengrundlage REM-NUT®



1.3 Ergebnis REM-NUT® Verfahren

1.3.1 Technologie Bewertung

Das REM-NUT® Verfahren lässt sich einfach im Ablauf einer Kläranlage ohne gezielte P-Elimination implementieren. Das Verfahren übernimmt damit die finale P-Entfernung (aber auch N-Entfernung) im Anschluss an das Nachklärbecken zur Einhaltung der vorgeschriebenen Ablaufgrenzwerte. Großtechnische Umsetzungen haben gezeigt, dass die Ionentauscher aufgrund ihrer zu geringen P-Selektivität, der ineffizienten Regeneration der Harze und deutlichen Verlusten der Adsorptionskapazität aufgrund störender Stoffe ungeeignet ist. Diese Faktoren sind neben der nicht gegebenen Wirtschaftlichkeit der Grund, warum dieses Verfahren der P-Rückgewinnung nicht mehr betrieben wird.

Anlagenteile	
Entwicklungsstand	Großtechnisch (eingestellt)
Komplexität Technologie	Ionentauscher, Fällung
Implementierung	Hauptstrom, Ablauf
Wartungsaufwand	gering
P-Elimination	Bio-P, keine gezielte P-Elimination
Schlammbehandlung	Faulung
Effektivität des Verfahrens	~ 90 %
Potential bezogen auf KA-Zulauf	~45 %
Qualitativer Ressourcenaufwand	NaOH, NaCl, Na ₂ CO ₃ , Mg-Fällmittel
Abfallstoffe	Beladenen Harze, Sole
Negative Effekte auf Abwasserreinigung	keine

Tabelle 9: Komplexität, Umsetzung und Rückgewinnungspotential REM-NUT®

1.3.2 Ökologische Bewertung (Systemgrenze Verfahren)

1.3.2.1 Stoffflussanalyse P – Einfluss auf Abwasserreinigungsprozess

Im Vergleich zum Stand der Technik zur P-Elimination wird im Falle einer Umsetzung des REM-NUT® Verfahrens im Ablauf einer Kläranlage, keine gezielte P-Elimination während der biologischen Abwasserreinigung angestrebt.

Im Falle der Referenzkläranlage steht bei fehlender P-Elimination rund 34.500 kg P/a für die Rückgewinnung zur Verfügung. Unter der Annahme eines Wirkungsgrades von 90 % können jährlich 30.700 kg P rückgewonnen werden. Folglich ist mit einer MAP-Produktion von jährlich 261.100 kg zu rechnen. (P-Gehalt im MAP = 11,8 %). Damit liegt das Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf bei rund 47 %. Der Ablauf des REM-NUT® Verfahrens gelangt mit einer P-Fracht von 3.800 kg P/a in den Vorfluter. Gelangt. Der N-Gehalt im Endprodukt beträgt 5 % und entspricht einer jährlichen Fracht von 13.100 kg N die in das Endprodukt eingebunden wird.

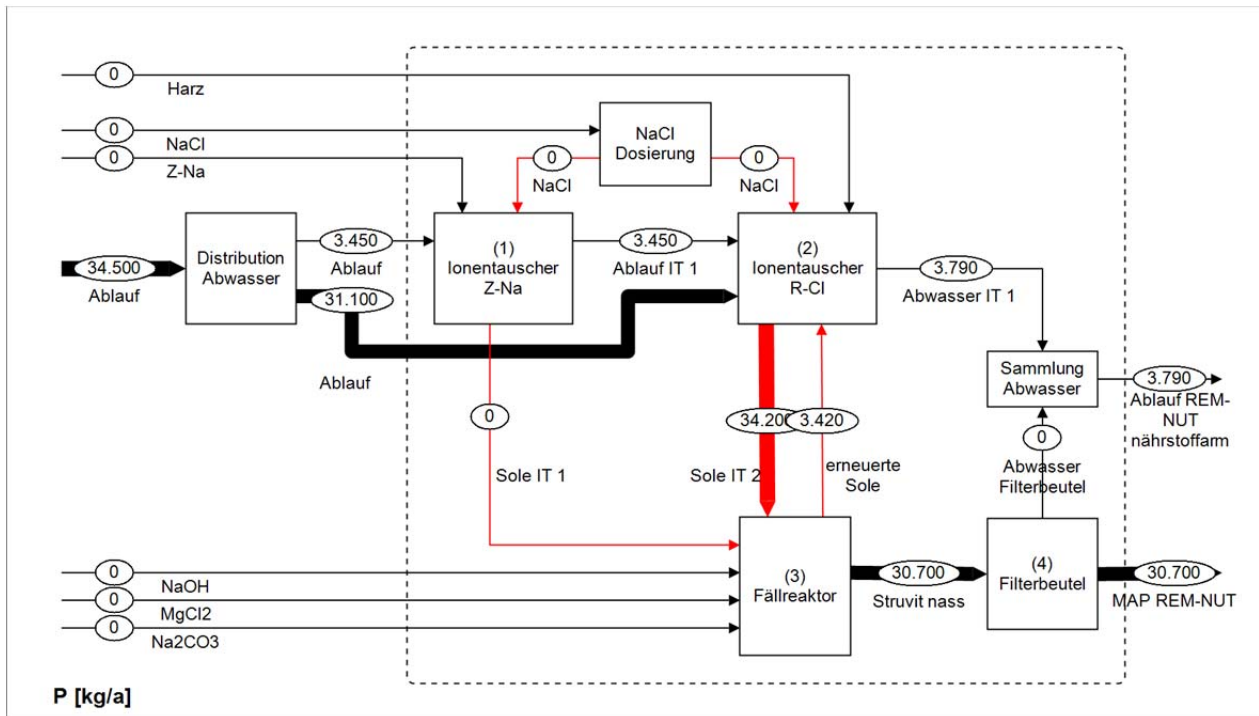


Abbildung 9: P-Stoffflussanalyse REM-NUT®

1.3.2.2 Fällmittel Einsparungen und Schlammreduktion

Im Vergleich zur Referenzkläranlage kann auf eine gezielte Fällung des Phosphors verzichtet werden. Berechnet wird der nicht benötigte Fällmittelbedarf auf Basis der Entfernung der 30.700 kg Pa/. Im Falle des REM-NUT® Verfahrens beträgt die eingesparte Fällmittelmenge im Vergleich zur Referenz rund 71 %. Mit verringertem Fällmitteleinsatz wird auch die anfallende Schlammmenge im Ausmaß von 2,5 kg TS/ kg Eisen reduziert, was einer Schlammreduktion im Vergleich zur Referenzkläranlagen von 14,1% oder 210 t/a entspricht.

	Reduktion [% bzw. kg]	[€/kg Nährstoff] bzw. [€/t KS TS]	Einsparung [€/a]
Fällmittel Einsparung	71%	-	73.000
Schlammfall	210.000 kg	-	60.800
Gesamt			133.800

Tabelle 10: Einsparungen Abwasserreinigung

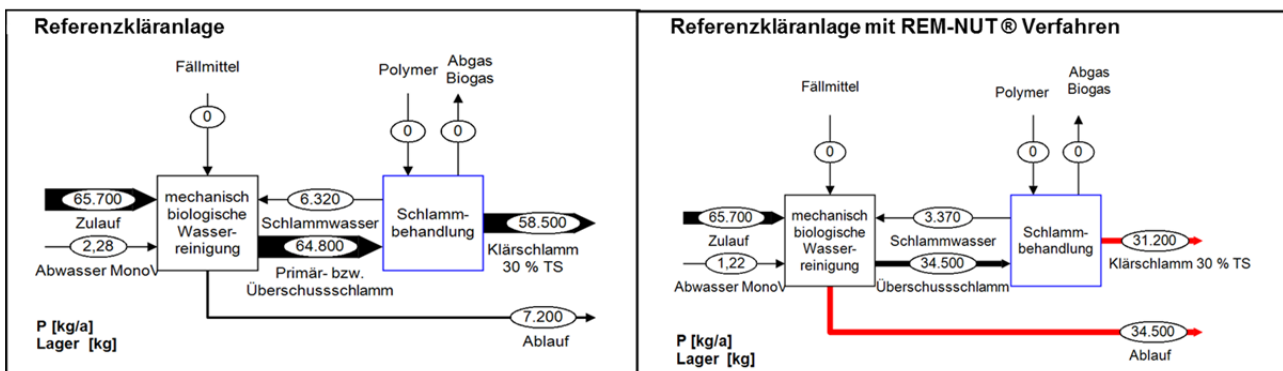
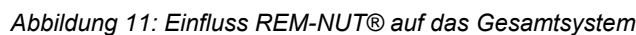


Abbildung 10: Einfluss REM-NUT® auf P-Emission Gewässer und P-Fracht Klärschlamm (2 signifikante Stellen)



Fällmittelbedarf [kg/a]	
Input P	34.200
Mg Bedarf	26.900
MgCl ₂ [100 %]	105.200
MgCl ₂ * 6H ₂ O	224.700
Basenbedarf [kg/a]	
NaOH [100 %]	128.700

Molare Masse [u]	
P	30,97
Mg	24,30
Cl	35,45
H	1,01
O	15,99

Magnesiumchloridhexahydrat:
MgCl₂ * 6H₂O
Wasseranteil: 43 %
Molare Masse: 203,3
Magnesiumchlorid:
MgCl₂
Wasseranteil: 0 %
Molare Masse: 95,2

Tabelle 12: Ressourcenbedarf REM-NUT® und molare Masse Fällmittel

	Produktspez. [kg P _{rückg.}]	Einwohnerspez. [EW*a]
Harze einmalig	1,4	0,42
Harze erneuerung	0,07	0,02
NaCl	11,3	3,5
Na ₂ CO ₃	0,7	0,2
MgCl ₂ [100%]	3,4	1,05
NaOH [100 %]	0,22	1,3
kWh	7,5	2,3
MAP	8,5	2,6

Tabelle 13: Produkt- und einwohnerspezifischer Ressourcenbedarf REM-NUT®

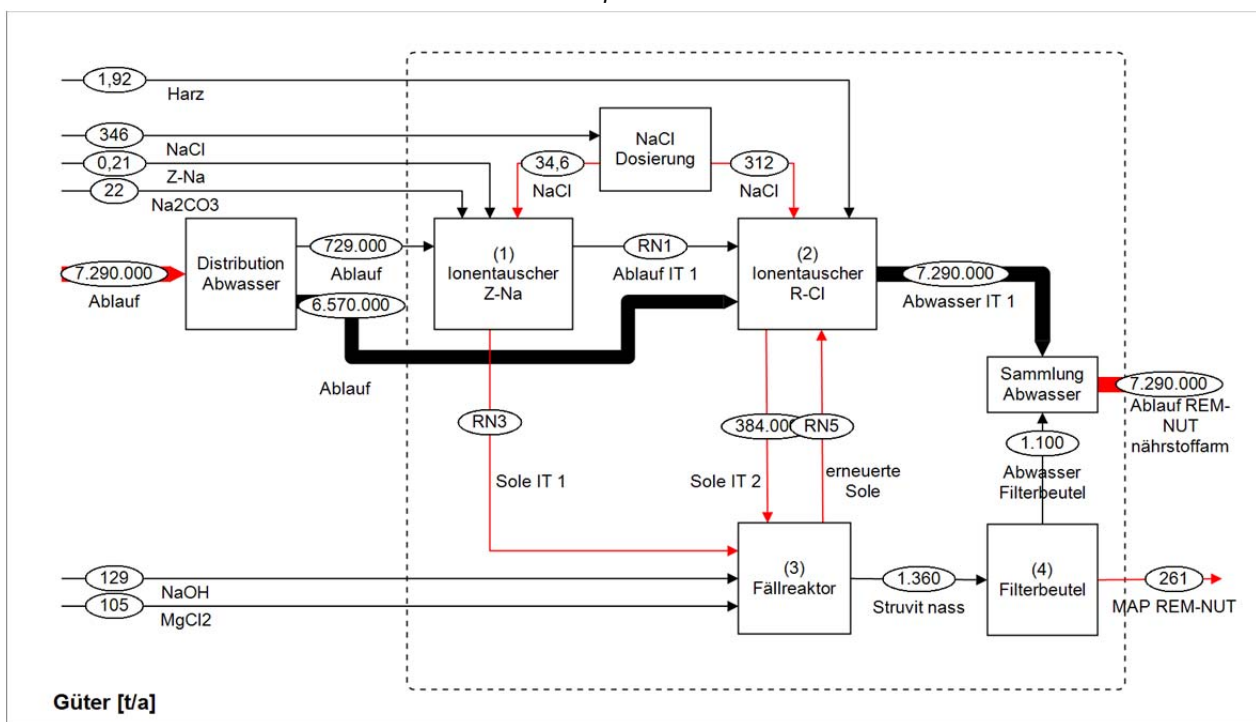


Abbildung 12: Ergebnis Güterflussanalyse REM-NUT®

1.3.2.5 Ergebnisse Energieflussanalyse

Auf Basis der Kostenaufgliederung des REM-NUT® Verfahrens auf der Pilotanlage wird im Falle der Implementierung des Verfahrens auf der Referenzkläranlage ein jährlicher Bedarf an elektrischer Energie von rund 230.000 kWh ermittelt (Tabelle 14). Bezogen auf die Referenzkläranlage mit einem Gesamtenergiebedarf von 23,15 kWh/EW*a beträgt der zusätzliche Energieaufwand für den Betrieb rund 10 %.

	Produktspez. [kg P _{rückg.}]	Einwohnerspez. [EW*a]
kWh	7,5	2,3

Tabelle 14: Spezifischer Energiebedarf REM-NUT®



1.3.2.6 Ergebnis indirekte gasförmige Emissionen

Auf Basis der Annahme einer Implementierung des REM-NUT® Verfahrens auf der definierten Referenzkläranlage, der Ergebnisse der Güterflussanalyse (auf Basis der Daten der Pilotanlage) und der indirekten Emissionen der notwendigen Ressourcen (GEMIS-Datenbank) kann ein jährlicher Ausstoß an CO₂-Äquivalenten bzw. SO₂-Äquivalenten von 323.400 kg bzw. 1.380 kg ermittelt werden. Die Emissionen bezogen auf 1 kg P_{rückg.} werden anhand der jährlichen Emissionen und der rückgewonnen P-Fracht von 30.700 kg/a errechnet und sind aus Abbildung 13 zu entnehmen. Aus dem Prozess sind keine direkten gasförmigen Emissionen zu berücksichtigen. Dominierende Emissionsquelle ist die Produktion des Mg-Fällmittels, gefolgt von der Natronlauge und dem Energiebedarf.

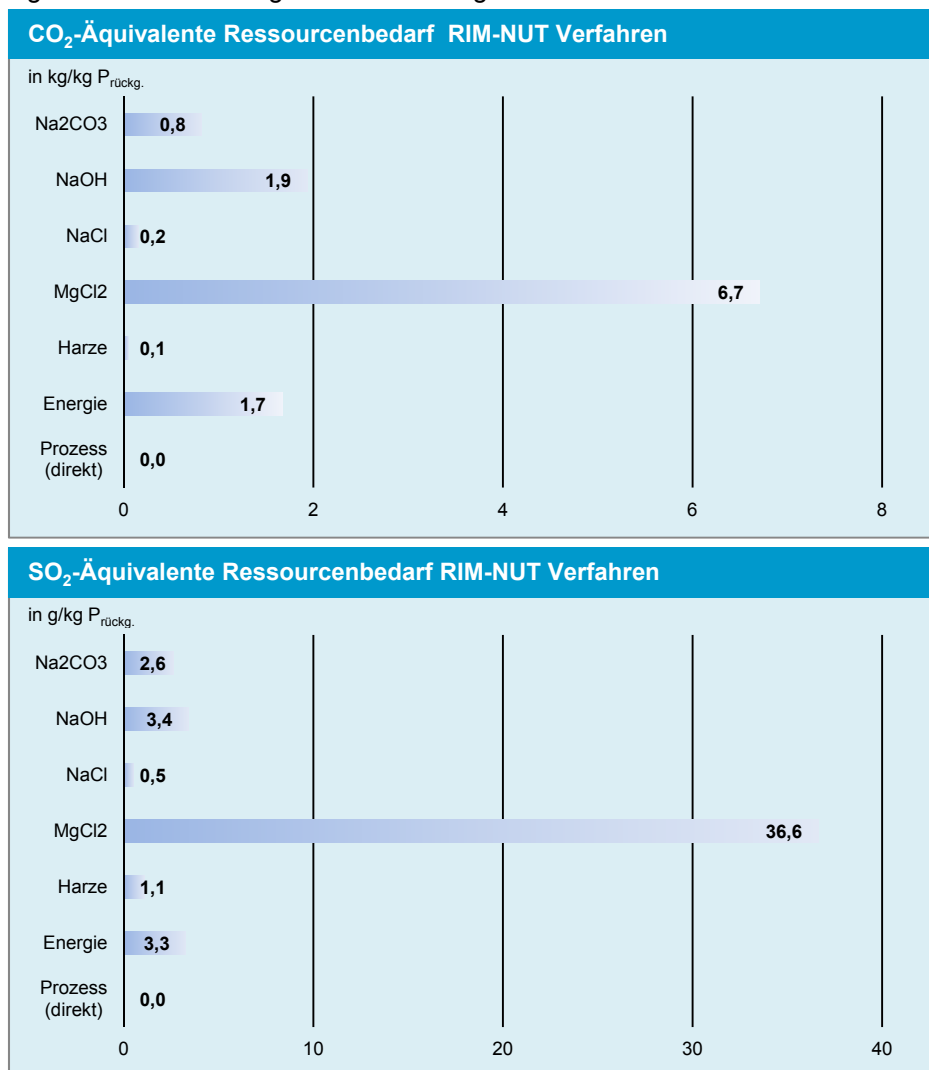


Abbildung 13: CO₂ bzw. SO₂-Äquivalente [kg bzw. g/kg P_{rückg.}] REM-NUT®

1.3.2.7 Indirekte Schwermetallemissionen REM-NUT®

Die indirekten Schwermetallemissionen werden analog zu den Gasemissionen auf Basis der Güterflussanalyse und der GEMIS-Datenbank ermittelt.

Indirekt Emissionen	Atmosphäre [g/a]	Hydrosphäre [mg/a]
As	0,89	0,0008
Cd	0,47	0,002
Cr	1,26	0,002
Cu	-	-
Hg	-	0,0010
Ni	2,02	-

Pb	3,99	0,014
Zn	-	-
AOX	-	12,1
PAK	0,0003	-
PCDD/F	0,000004	-

Tabelle 15: Indirekte SM-Emissionen REM-NUT®

1.3.2.8 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der kumulierte Energieaufwand wird analog zu den Gasemissionen auf Basis der Güter- und Energieflussanalyse und der GEMIS-Datenbank ermittelt.

KEA	[kWh]	[kWh/EW*a]	[kWh/kg P _{rückg.}]
Chemikalien	1.102.000	11,0	35,8
Elektrische Energie Betrieb REM-NUT®	443.000	4,4	14,4
Gesamt	1.544.700	15,4	50,3

Tabelle 16: Kumulierter Energieaufwand REM-NUT®

Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren

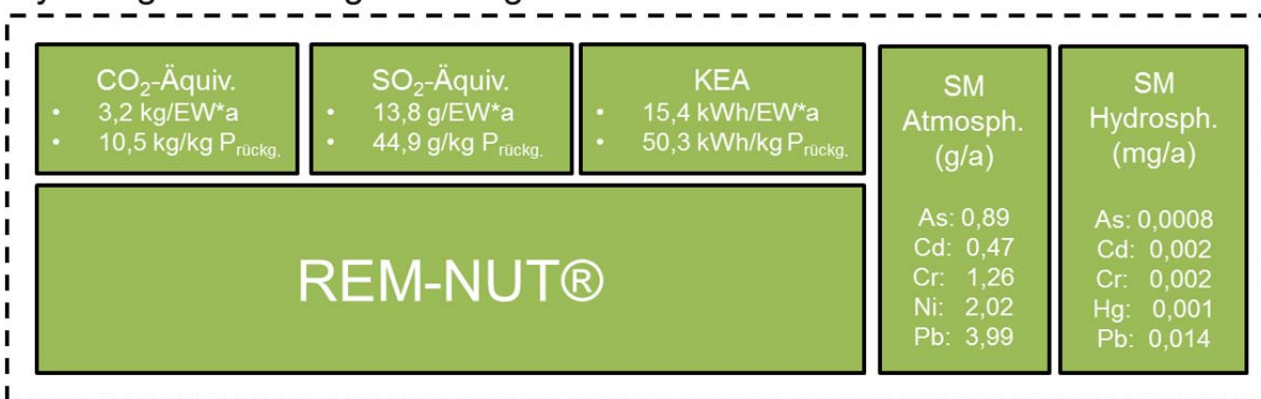


Abbildung 14: Zusammenfassung Parameter ökologische Bewertung (Systemgrenze Rückgewinnungsverfahren)

1.3.3 Ergebnisse ganzheitliche Bewertung REM-NUT®

Die Implementierung der REM-NUT® Anlage hat Einfluss auf den Abwasserreinigungsprozess, der wiederum nachfolgende Prozesse beeinflussen, die im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung berücksichtigt werden. Folgende Faktoren und deren Einfluss auf weitere Prozesse werden berücksichtigt:

Faktor	Einfluss auf
Reduktion Fällmittel (-71 %)	Gezielte P-Fällung während der Abwasserreinigung fällt aus – verringertes Fällmittelbedarf, verringerte indirekten Emissionen aus Fällmittelproduktion, Kosten Abwasserreinigung
Reduktion Schlammfall (-14,1 %)	Reduktion aufgrund reduziertem Fällmittelbedarf, Transport, Entsorgungskosten.
Ressourcenaufwand REM-NUT®	Indirekte Emissionen, Kosten
MAP-Produktion	Kosten (Erlöse)

Tabelle 17: Einflussfaktoren ganzheitliche Bewertung REM-NUT®



Berücksichtigung Transport

Infolge des verringerten Klärschlammanfalles (-14,1 %) verringert sich sowohl die Klärschlammfracht zur Verbrennung als auch die Fracht zur Entsorgung der anfallenden Aschen und Filterkuchen (Tabelle 18).

Transportwege	[t/a]	[tkm]	[€/EW*a]
Klärschlamm – MonoV	4.276	598.600	0,84
Flug- und Bettasche - Reststoffdeponie	716	71.600	0,10
Filterkuchen - Untertagedeponie	32	32.000	0,04
Gesamt Transport		702.200	0,98

Tabelle 18: Transportwege REM-NUT®

1.3.3.1 Ergebnis Gasemissionen

Im Vergleich zur Referenzsituation ist eine deutliche Reduktion der treibhausrelevante Gase (-44 %), sowie der Gase mit Versauerungspotential (-73 %) zu beobachten (Tabelle 19). Der dominante Anteil ist auf die Bio-P Entfernung und der damit entfallende Bedarf an Fällmitteln (indirekte Emissionen) zurückzuführen. Zusätzlich sinken infolge des verringerten Schlammanfalles die zu transportierenden Frachten, der Rohstoffbedarf bei der Verbrennung und die zu entsorgenden Reststoffe. Ähnlich verhält es sich beim kumulierten Energieaufwand. Die Reduktion beträgt -33 % in Relation zur Referenzsituation (*Verringerter Fällmittelbedarf, ** Verringerter Schlammanfall

Tabelle 20).

CO ₂ -Äquivalente	[kg]	[CO ₂ -Äquiv./EW*a]
REM-NUT®	441.800	4,4
Referenz	368.600	3,7
Δ	+20%	
SO ₂ -Äquivalente	[kg]	[SO ₂ -Äquiv./EW*a]
REM-NUT®	1.210	0,012
Referenz	1.260	0,013
Δ	-4%	

Tabelle 19: CO₂ bzw. SO₂-Äquivalente Prozesskette REM-NUT®

1.3.3.2 Ergebnis kumulierter Energieaufwand

KEA	Rohstoffe	Energie	[kWh/EW*a]	[kWh/kg P _{rückg.}]
Kläranlage	262.000*	1.006.000	12,7	
REM-NUT®	1.101.700	443.000	15,4	
Monoverbrennung	145.700**	946.600**	10,9	
Deponie	13.100*		0,1	
Transport	117.400**		1,2	
Gesamt	4.035.500		40,3	
Substitution Strom	-481.800		4,8	
Substitution Wärme	-1.317.000		13,2	
Substitution P+N-Dünger	-347.600		3,5	
Gesamt	1.899.000		19,0	
Referenz	1.252.688		12,5	
Δ	+67%			

*Verringerter Fällmittelbedarf, ** Verringerter Schlammanfall

Tabelle 20: Kumulierter Energieaufwand gesamte Prozesskette

In werden die ökologisch relevanten Bewertungsparameter CO₂- und SO₂-Emissionen sowie der kumulierte Energieaufwand in Relation zur Referenzsituation zusammenfassend bezogen auf EW*a dargestellt. Die ökologische Bewertung verdeutlicht, dass infolge der Implementierung des REM-NUT® Verfahrens nur geringe bzw. moderate Steigerungen der CO₂ bzw. SO₂-Emissionen zu erwarten sind.

Systemgrenze gesamte Prozesskette

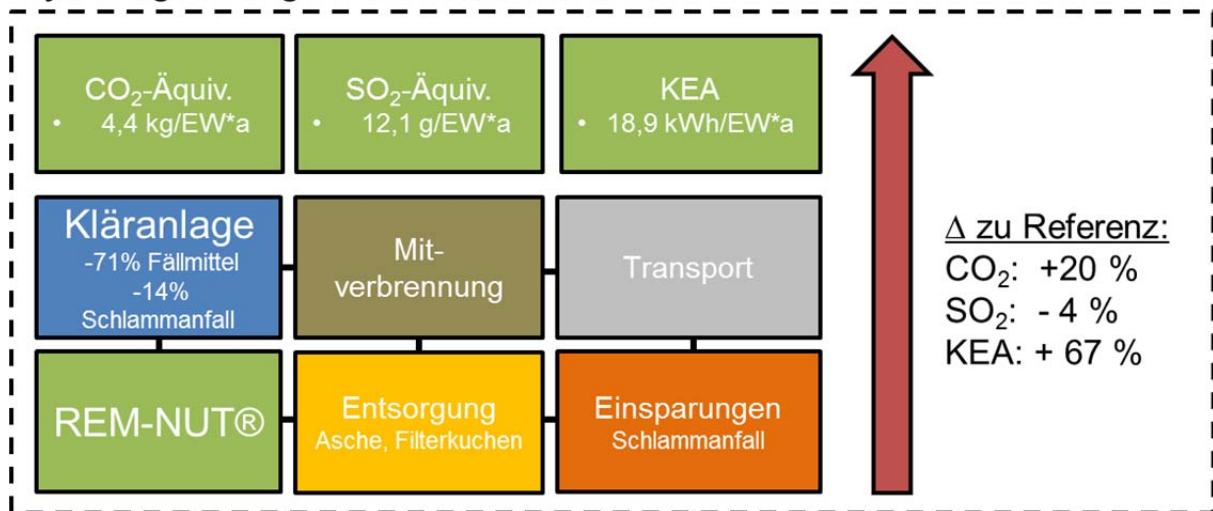


Abbildung 15: Veränderung der gasförmigen Emissionen und des KEA in Relation Referenzsituation

1.3.3.3 Ergebnisse Stoffflussanalyse Schwermetalle und organische Spurenstoffe

Auf Basis der Stoffflussanalysen können die Pfade von P und den ausgewählten Schwermetallen zu den Zielprozessen nachvollzogen werden (Abbildung 16). Die Phosphorbilanz verdeutlicht, dass in Relation zum P-Input einer Kläranlage mit dem REM-NUT® Verfahren rund 50 % in die Landwirtschaft gebracht werden kann. Jener P-Anteil der in die Gewässer geleitet wird bleibt konstant. Folglich gelangen rund 40 % des Phosphors auf eine Deponie. Aufgrund der geringen SM-Gehalte im Endprodukt gelangen kaum Schwermetalle auf die landwirtschaftlichen Flächen. Hinsichtlich potentiell höherer SM-Einträge in Hydrosphäre oder Atmosphäre mit dem REM-NUT Verfahren, sind aufgrund der Prozessführung keine signifikanten Veränderungen gegenüber der Referenzsituation zu erwarten. Im Falle einer Ausbringung des Endproduktes nimmt die P- und Schwermetallfracht in die Landwirtschaft im Ausmaß der rückgewonnen P-Fracht bzw. der SM-Fracht im Endprodukt zu. Organische Spurenstoffe sind im Endprodukt nicht nachweisbar, womit auch keine Spurenstoffe über das Endprodukt in die Landwirtschaft gelangen.

P- und Schwermetallpfade REM-NUT Verfahren

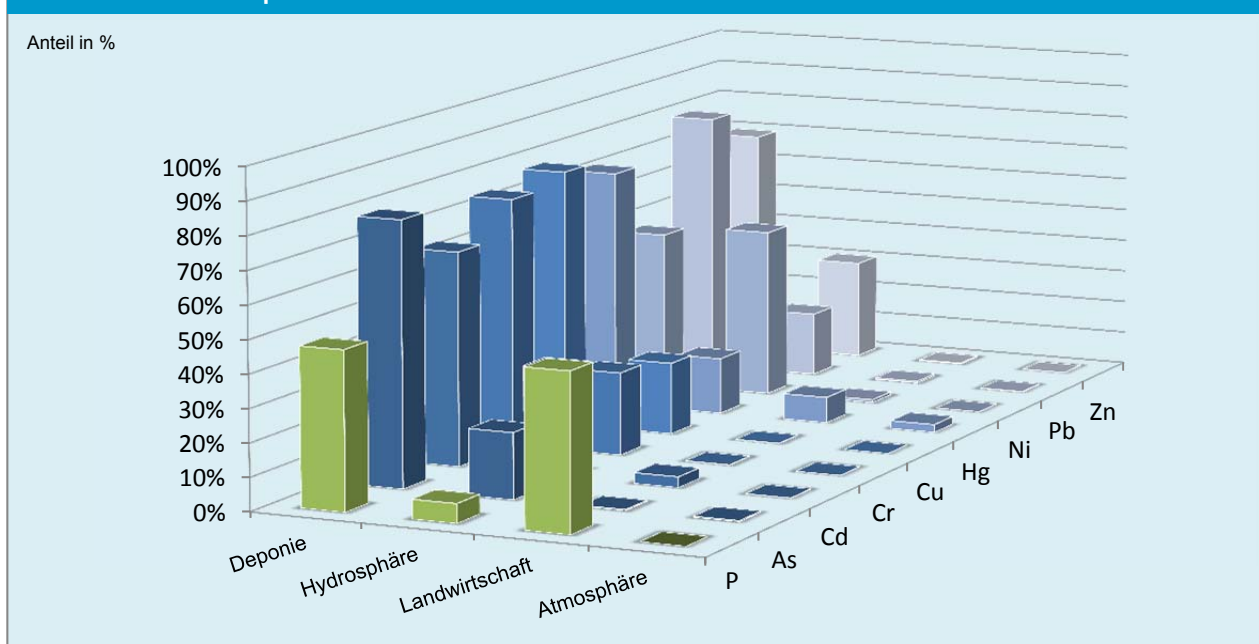


Abbildung 16: P- und Schwermetallpfade in % bezogen auf Zulauf der Referenzkläranlage (REM-NUT®)



1.3.3.4 Ergebnis Schwermetallemissionen

Verglichen mit den direkten SM-Emissionen machen die indirekten SM-Emissionen (Tabelle 15) nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamt-Schwermetallemissionen aus. Durch die Implementierung des Ostara Verfahrens auf einer Anlage werden die direkten Emissionen nicht verändert. Geringe Veränderungen sind bei den indirekten Emissionen aufgrund des verringerten Fällmittelbedarfs und geringerem Schlammanfall (Transportaufwand, Ölbedarf bei Verbrennung), sowie durch Gutschriften der Nährstoffe P und N im Endprodukt zu erwarten. Die Veränderungen der Emissionen im speziellen in die Hydrosphäre sind aufgrund des kleinen Anteils der veränderlichen indirekten Emissionen, aber der als statisch angenommenen direkten Emissionen, sehr gering und liegen im Bereich der Unschärfe der Datensicherheit.

Emissionen Gesamt	Atmosphäre [g/a]	Δ Referenz [%]	Hydrosphäre [kg/a]	Δ Referenz [%]
As	8,5	0,8	2,15	2,33
Cd	4,5	-3,3	1,21	0,13
Cr	46,5	0,2	25,85	-0,10
Cu	-	-	-	-
Hg	-	-	0,47	-1,43
Ni	46,8	-23,1	-	-
Pb	130,4	0,1	25,09	-0,6
Zn	-	-	-	-
AOX	-	-	338,7	0,0
PAK	0,2	0,01	-	-
PCDD/F	0,000001	-	-	-

Tabelle 21: Direkte Emissionen REM-NUT® Prozesskette, Vergleich Referenz

1.3.3.5 Ergebnis Endprodukt

Endprodukt ist ein sehr reines MAP mit sehr geringen Schwermetallgehalten, die deutlich unter den Anforderungen der Düngemittelverordnung liegen. Vereinzelt können aufgrund der nicht selektiven Fällungen Verbindungen wie z.B. Magnesiumkaliumphosphate (MgKPO_4) gebildet werden. Bezogen auf den Hauptnährstoff Phosphor liegen die Schwermetallkonzentrationen teils deutlich unter jenen eines handelsüblichen Mineraldüngers (SSP).

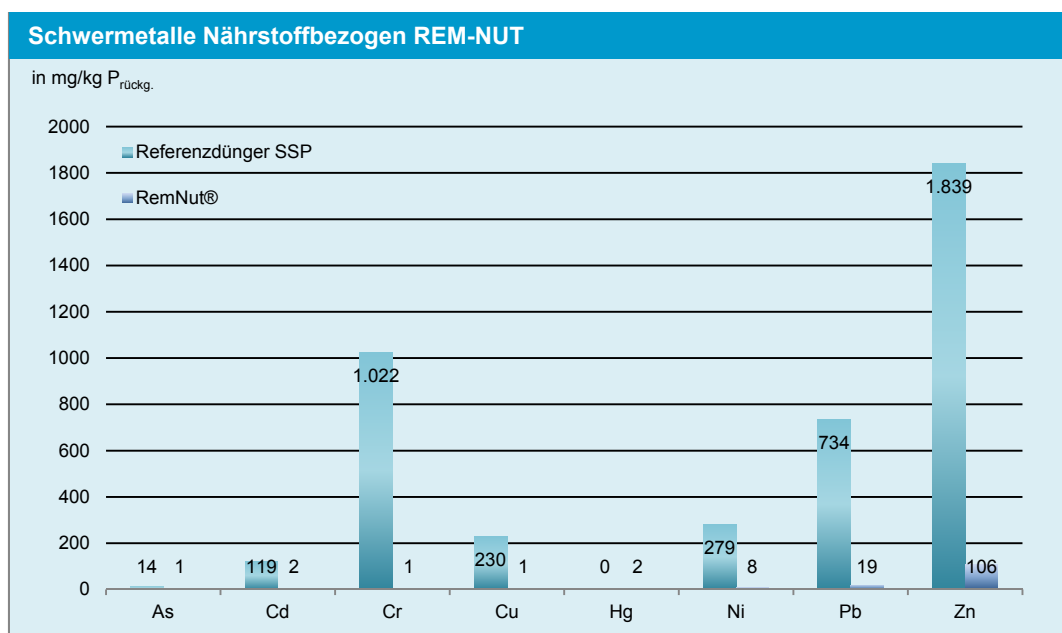


Abbildung 17: Nährstoffbezogene Schwermetallaufbringung REM-NUT® Endprodukt Vergleich Handelsdünger (SSP)

Bewertung Endprodukt	REM-NUT®	SSP
Löslichkeit	Gut	Sehr Gut
Düngewirksamkeit	Gut/Sehr Gut	Sehr Gut
Monetäre Wert [€/t Endprodukt]	366	230
Anorganische Verunreinigungen		
SM:P [mg Cd/kg P]	2,1	118
Schadeinheit [SE/kg P]	0,005	1,26
Referenzbodenmethode [*]	50.500 (Hg*)	1.450 (Cd*)
Tolerierbare Menge bezogen auf Cd	4,8	
Organische Verunreinigungen		
Keine organische Spurenstoffe	5 ¹	5
Keine hygienischen Bedenken	5 ¹	5
Handhabung		
Einfache Lagerung möglich	5	5
Direkter Einsatz in LW möglich	4	5

Tabelle 22: Bewertung MAP REM-NUT®

Das Cd:P Verhältnis ist mit 2,1 mg Cd/kg P sehr gering und liegt deutlich unter jenem eines handelsüblichen Düngers (SSP). Sowohl das Schadeinheitenmodell als auch die Referenzbodenmethode verdeutlichen die sehr geringen Gehalte an Schwermetallen. Theoretisch kann das MAP-Endprodukt rund 50.500 Jahre aufgebracht werden bis die tolerierbare Konzentration des ersten begrenzenden Schwermetalls erreicht wird. In diesem Fall ist Quecksilber das limitierende Element. Bei der Betrachtung der maximal tolerierbaren Menge bezogen auf den Cd, könnte das REM-NUT® Endprodukt im Vergleich zum SSP um den Faktor 4,8 häufiger ausgebracht werden. Organische Spurenstoffe bzw. hygienische Bedenken sind nach Angaben des Herstellers keine nachweisbar (+¹) bzw. nicht gegeben (+¹). Aufgrund der Verfahrenstechnik (Ionentauscher und Fällung) entsteht ein Endprodukt mit uneinheitlicher Körnung und kann damit mit modernen Ausbringungsgeräten nicht direkt in der Landwirtschaft ausgebracht werden. Eine Lagerung ist jedoch ohne Einschränkung möglich.

1.3.4 Ökonomische Bewertung

Wesentliche Voraussetzung für größenabhängige Kostenkalkulationen ist die Annahme und Festlegung von Up- und Downscalingfaktoren. Auf Basis der vorliegenden Investitionskosten für die großtechnische Umsetzung auf der Kläranlage in Bari (200.000 EW) wird eine Beziehung zur Ausbaugröße, den entsprechenden Kosten und dem rückgewinnbaren P-Potential hergestellt.

1.3.4.1 Up- and Downscaling Investitionskosten REM-NUT

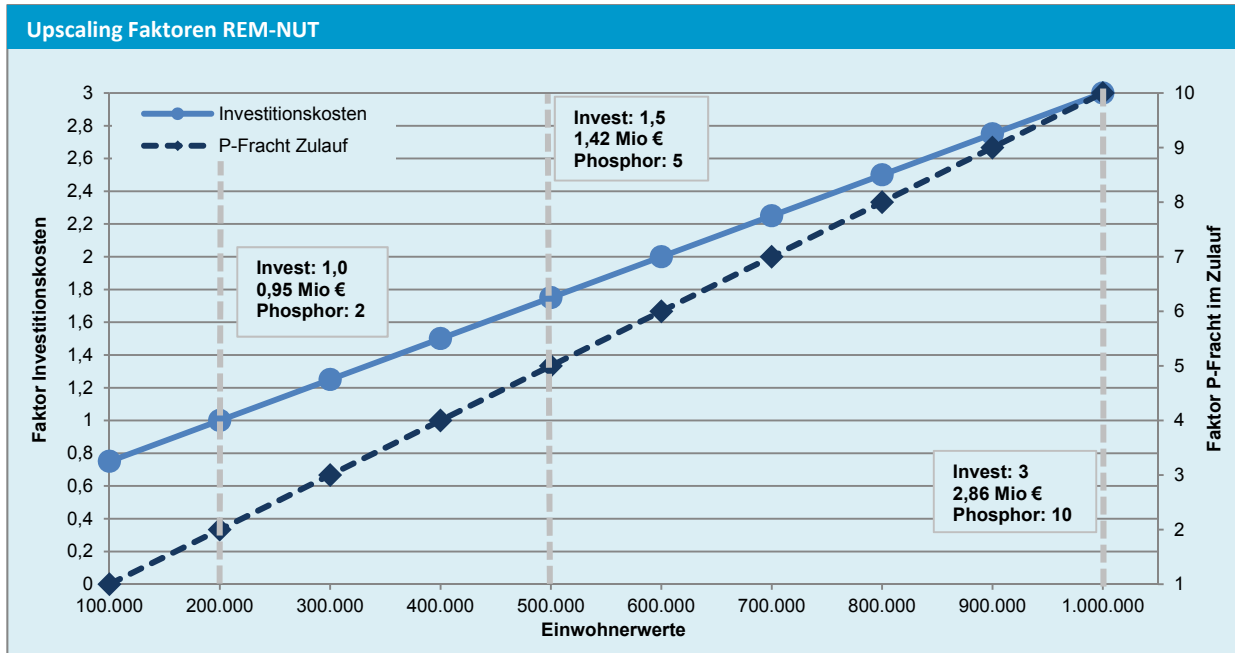


Abbildung 18: Upscaling Faktoren Investitionskosten REM-NUT®

Belastung [EW]	Investitionskosten [€]	Faktor Investition	Energie [Faktor]	Personal [MA/a]
100.000	715.000	0,75	0,75	0,75
200.000	950.000*	1	1	1
500.000	1.430.000	1,5	1,25	2
1.000.000	2.860.000	3	2	4

*Entspricht den Kosten für großtechnische 200.000 EW Anlage in Bari.

Tabelle 23: Entwicklung Investitionskosten in Abhängigkeit des Anlagenausbaus

Folgendermaßen ist Abbildung 18 zu interpretieren: Ausgangssituation ist die Errichtung des REM-NUT® Verfahren auf der 200.000 EW Anlage in Bari. Das Investitionsvolumen beträgt dabei rund 0,95 Mio. €. Das P-Potential im Zulauf entspricht dem doppelten der definierten Referenzkläranlage mit 100.000 EW (Faktor 2). Die Investitionskosten für eine 100.000 EW Anlage liegen bei rund 715.000 € (ermittelt als Mittelwert aus Investition für 100.000 EW Pilotanlage + Aufschlag von 10 % aufgrund der höheren Abwasserbelastung von 483.000 € und der Umsetzung des Verfahrens auf der 200.000 EW Anlage mit Kosten von ~950.000 €). Daraus abgeleitet wird ein Downscaling Faktor von 0,75. Der Downscaling Faktor wird reziprok als Up-Scaling Faktor mit 1,25 für eine Kläranlage mit einer um 100.000 EW höheren Belastung angenommen. Das bedeutet, dass im Falle des REM-NUT® Verfahren im Vergleich zu anderen Verfahren eine lineare Investitionskostenentwicklung angenommen wird. Wird REM-NUT® auf einer 500.000 EW Anlage errichtet werden, liegen im Vergleich zur 200.000 EW Anlage die Investitionskosten um den Faktor 1,5 höhere, während das P-Potential um den Faktor 2,5 steigt.

1.3.4.2 Jahreskosten

Die Investitionskosten für das REM-NUT® Verfahren liegen im Bereich von 440.400 – 950.000 €. Als Berechnungsgrundlage für die 100.000 EW Referenzanlage werden 715.000 € veranschlagt. Die Entwicklung der Investitionskosten ist aus Tabelle 23 zu entnehmen. Rund 67 % der Kosten entfallen auf die Bautechnik (Nutzungsdauer von Ionentauscher von 10-15 Jahre) und 33 % auf die Maschinentechnik (ND 15 Jahre). Diese Kostenverteilung wird vereinfacht für alle Ausbaugrößen angewendet. Aufgrund des eher wartungsarmen Betriebes werden die Wartungskosten mit 1 % der Investitionskosten festgelegt. Der Personalaufwand ist gering und kann mit 1,5 MA/Jahr angenommen werden.

Jahreskosten	Menge (kg)	Preis/Einheit	€/a
Kapitalkosten			48.900
Wartung + Reparaturen			7.200
Harze Back up			10.500
MgCl ₂ *6 H ₂ O	224.700	110 €/t	106.700
NaOH	128.700	330 €/t	42.500
NaCl	346.300	80 €/t	27.700
Na ₂ CO ₃	22.000	180 €/t	4.000
Energie	231.300	0,1 €/kWh	23.100
Personal	1,5	50.000 €/MA	62.500
Sonstiges	-	-	13.900
Entsorgung	-	-	-
Betriebskosten			216.000
Gesamt			264.900

Tabelle 24: Jahreskosten (gerundet) REM-NUT® (Referenzkläranlage 100.000 EW)

Einsparungen/Erlöse	Menge (kg)	Preis/Einheit	€/a
MAP Erlöse	261.100	366	95.600
Einsparung Fällmittel	-	-	73.000
Schlammreduktion	210.000	290	60.800
Gesamt		290	229.400

Tabelle 25: Einsparungen und Erlöse (gerundet) REM-NUT® (Referenzkläranlage 100.000 EW)

Spezifische Kosten	€
€/kg P _{rückgewonnen}	8,5
€/EW*a	2,6
€/E*a	5,2

Tabelle 26: Spezifische Kosten REM-NUT® (100.000 EW)

Die Berechnungen auf Basis der Daten der Pilotanlage zeigen, dass das REM-NUT® Verfahren unter den gegebenen Voraussetzungen (Referenzkläranlage 100.000 EW) nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Hauptverantwortlich sind die hohen Betriebskosten, deren Anteil an den Jahreskosten bei rund 80 % liegt. Bei den Investitionskosten entfällt rund 1/3 der Kosten auf die benötigten Harze, bei den Betriebskosten hingegen liegt der Anteil der Kosten für das Back Up Harz (zur Wiederauffüllung der Ionentauscher) bei nur 5 %. Bereits bei einer Kläranlagengröße von 200.000 EW, das entspricht der doppelten Phosphorzulaufkraft, kann das REM-NUT® Verfahren unter der Berücksichtigung der Einsparungen aus der reduzierten Fällmittelmenge, der verringerten Schlammmenge und den MAP-Erlöse nahezu wirtschaftlich betrieben werden. Das heißt, die Jahreskosten werden durch die möglichen Einsparungen und Erlöse fast gedeckt bzw. es kann ein Überschuss erwirtschaftet werden. Die Kosten können weiter gesenkt werden, wenn das REM-NUT® Verfahren auf einer Kläranlage ab 500.000 EW implementiert wird. Während die P-Fracht direkt proportional zur Kläranlagengröße zunimmt, gilt dies für die Investitionskosten beim Up-Scaling nicht. Direkt proportional zur Anlagengröße steigen die Kosten für Chemikalien und Harze, während Kosten für Energie, Wartung und Personal ungleich ansteigen. Fällmittel, Basen und Energie, während die Kosten für Wartung und Personal gleich bleiben. Im Falle einer Umsetzung auf einer Kläranlage mit noch höherer Belastung wird angenommen, dass die gesamten Anlagenteile ein zweites Mal gebaut werden und damit die Kosten kaum weiter reduziert werden können.

Auf Basis der Datengrundlage der großtechnisch umgesetzten Anlage werden deutlich abweichend Kosten berechnet. Die Kosten für Chemikalien der großtechnischen Anlage liegen umgerechnet auf die Referenzkläranlagen um den Faktor 7,5 über Kosten der Pilotanlage. Dementsprechend sind deutlich höheren Kosten wie in Abbildung 19 dargestellt zu erwarten. Diese können zwar bei einer Umsetzung auf größeren Kläranlagen ebenfalls gedrückt/gesenkt werden, doch ist ein wirtschaftlicher Betrieb unter keinen Umständen möglich. Für ein Kilogramm Phosphor liegen die Kosten im Bereich von 21 - 24,5 € und die Kosten pro Einwohnerwert im Bereich von 6 - 7,5 €.

1.3.4.3 Variantenrechnung

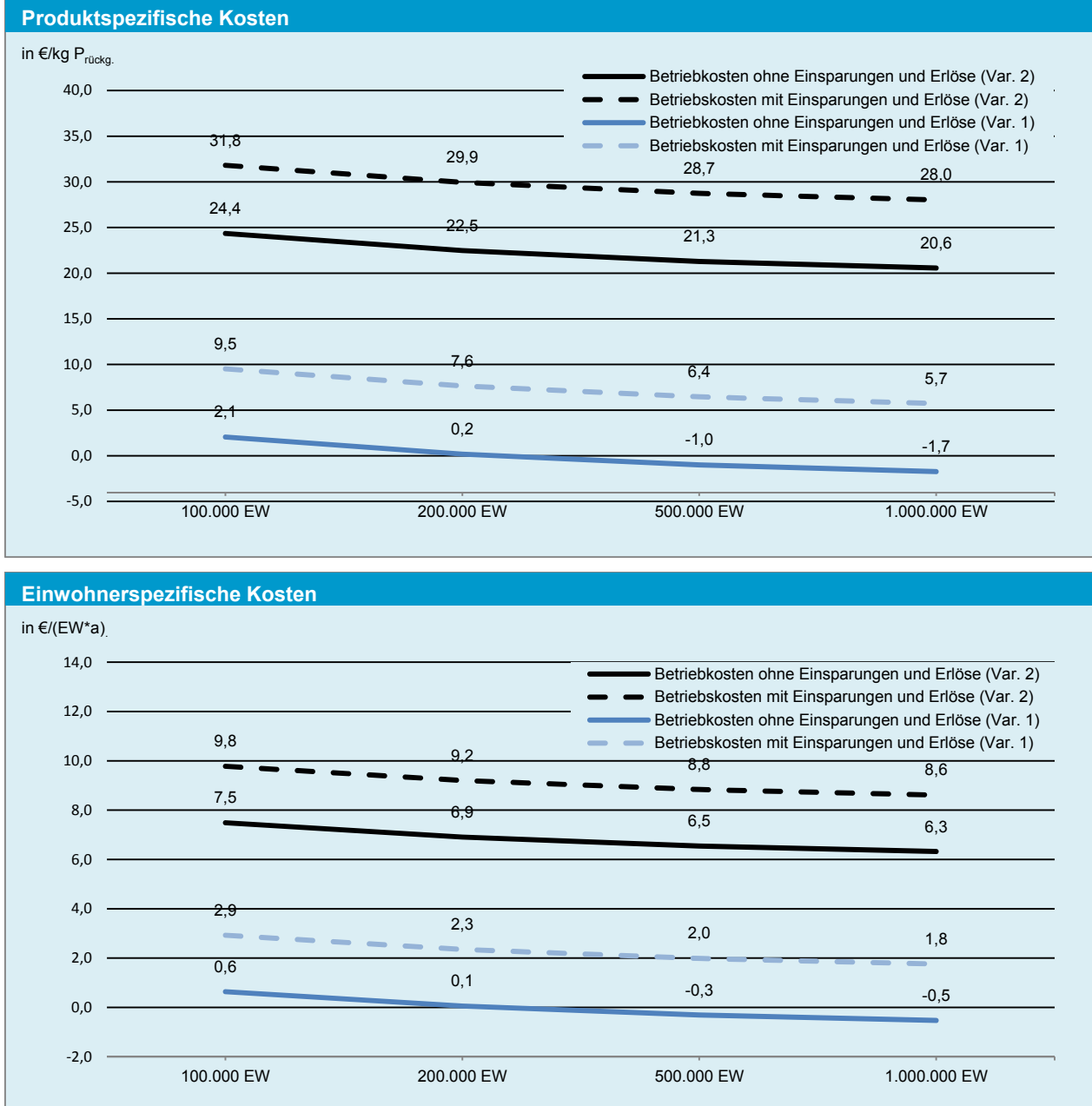


Abbildung 19: Produktspezifische Kosten REM-NUT®; Variation Datengrundlage

1.3.4.4 Kostenaufgliederung

Auch anhand der Kostenaufgliederung auf Basis der Pilotanlage kann auf ein ressourcenintensives Verfahren geschlossen werden. Der Anteil der Kapitalkosten an den Jahreskosten liegt bei nur rund 1/5. Rund 50 % der Betriebskosten sind auf den Chemikalienbedarf zurückzuführen. Im Fall einer größeren Auslegung des Verfahrens können Betriebskosten wie Personal, Energie und Wartung reduziert werden, womit auch deren Anteil sinkt und der Anteil der Kosten für Chemikalien bei rund 70 % liegt.

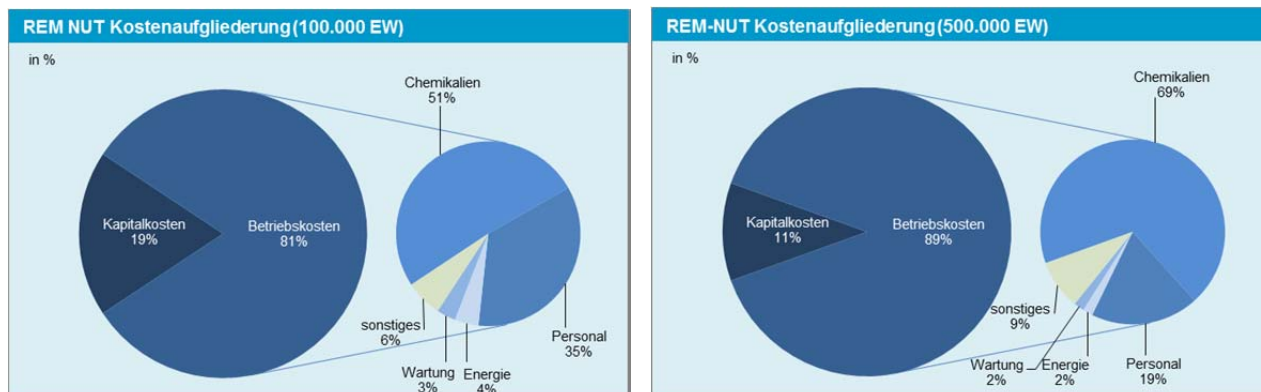


Abbildung 20: Kostenaufgliederung REM-NUT® 100.000 EW (links) und 500.000 EW (rechts)

1.3.4.5 Amortisation

Anhand der Kapitalwertmethode (Jahreskosten ohne Kapitalkosten abzüglich sämtlicher Einsparungen bzw. Erlöse) wird für die 100.000 EW Anlage und eine Amortisationszeit von 27-28 Jahren errechnet. Das bedeutet, dass keine Amortisierung der Anlage vor der Neuinvestition der Maschinenteknik nach 15 Jahren stattfindet. Im Falle einer Umsetzung des Verfahrens auf größeren Anlagen, ist eine Amortisation bereits nach wenigen Jahren möglich. Grund dafür sind die nicht linear ansteigenden Kosten für Personal, Energie und Wartung. Auf Basis der Datengrundlage der großtechnischen Umsetzung ist keine Amortisation möglich.

Anlagengröße	Amortisationszeit [a] Var. 1	Amortisationszeit [a] Var. 2
100.000 EW	>15	>15
200.000 EW	9-11	>15
500.000 EW	5-6	>15
1.000.000 EW	3-4	>15

Tabelle 27: Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße

1.3.4.6 Kosten gesamte Prozesskette

Die Umsetzung des REM-NUT® Verfahrens erforderten den gänzlichen Verzicht auf eine gezielte P-Entfernung und damit den Einsatz von Fällmitteln im Abwasserreinigungsprozess. Der Fällmittelbedarf wird um 71 % und damit gleichzeitig auch der Schlammfall um 14 % reduziert. Der verringerte Schlammbedarf hat zum einen Einfluss auf die Kosten der Mitverbrennung als auch auf die Transportkosten. Einsparungen resultieren damit aus dem bereits genannten reduzierten Fällmittelbedarf und den reduzierten Entsorgungskosten für den Klärschlamm. Die Erlöse stammen aus dem Verkauf des MAP. Im Vergleich zur Referenzsituation ist im Falle der Umsetzung der Anlage nach den Angaben der Pilotanlage mit geringfügig höheren Kosten von rund 11,73 €/(EW*a) zu rechnen. Das entspricht Mehrkosten von rund + 5 %. Im Fall einer Umsetzung auf einer Kläranlage mit größerer Belastung ist aufgrund der reduzierten Verfahrenskosten, in erster Linie der Investitionskosten des REM-NUT Verfahrens mit gleichen Kosten (+/- 0 % 200.000 EW) zu rechnen bzw. eine Reduktion (- 3 %) der Kosten im Vergleich zur Referenzsituation möglich (Tabelle 28).

Auf Basis der Kostenkalkulation nach den Daten der großtechnisch umgesetzten REM-NUT Anlage sind deutlich höhere Kosten im Bereich von +59 – 67 % im Vergleich zur Referenzsituation zu erwarten (Tabelle 29).

Kostenstellen (Kosten in €/EW*a)	100.000 EW	200.000 EW	500.000 EW
Kläranlage			
Abwasserreinigung	4,50	4,50	4,50
Schlammbeh. inkl. Entwässerung	1,50	1,50	1,50
Kosten Kläranlage	6,00	6,00	6,00
Rückgewinnungsverfahren	2,93	2,35	1,98
Verbrennung (Mitverbrennung)	3,08	3,08	3,08
Entsorgung			
Asche/Schlacke/Flugasche	0,36	0,36	0,36
Filterkuchen	0,06	0,06	0,06
Transport			
Schlamm zu Verbrennung	0,84	0,84	0,84
Asche zu Deponie	0,10	0,10	0,10
Filterkuchen zu Untertagedeponie	0,04	0,04	0,04
Summe Kosten	13,41	12,83	12,47
Einsparungen und Erlöse			
Einsparungen Fällmittel	0,73	0,73	0,73
Erlös Endprodukt	0,96	0,96	0,96
Summe Einsparungen und Erlöse	1,69	1,69	1,69
Gesamtkosten	11,73	11,15	10,78
Δ zu Referenz	+5%	+0%	-3%

Tabelle 28: Jahreskosten gesamte Prozesskette REM-NUT® (Datengrundlage Pilotanlage)

Kostenstellen (Kosten in €/EW*a)	100.000 EW	200.000 EW	500.000 EW
Kläranlage			
Abwasserreinigung	4,50	4,50	4,50
Schlammbeh. inkl. Entwässerung	1,50	1,50	1,50
Kosten Kläranlage	6,00	6,00	6,00
Rückgewinnungsverfahren	9,78	9,20	8,83
Verbrennung (Mitverbrennung)	3,08	3,08	3,08
Entsorgung			
Asche/Schlacke/Flugasche	0,36	0,36	0,36
Filterkuchen	0,06	0,06	0,06
Transport			
Schlamm zu Verbrennung	0,84	0,84	0,84
Asche zu Deponie	0,10	0,10	0,10
Filterkuchen zu Untertagedeponie	0,04	0,04	0,04
Summe Kosten	20,26	19,69	19,32
Einsparungen und Erlöse			
Einsparungen Fällmittel	0,73	0,73	0,73
Erlös Endprodukt	0,96	0,96	0,96
Summe Einsparungen und Erlöse	1,69	1,69	1,69
Gesamtkosten	18,58	18,00	17,63
Δ zu Referenz	+67%	+62%	+59%

Tabelle 29: Jahreskosten gesamte Prozesskette REM-NUT® (Datengrundlage großtechnische Umsetzung)

1.3.4.7 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 21 verdeutlicht, dass die Preisänderung für Rohstoffe (+20 %) aufgrund der ressourcenintensiven Prozessführung einen deutlichen Einfluss (+47%) auf die Kosten haben. Da keine Säuren verwendet werden, treten bei Szenario 2 keine Änderungen des Preises auf. Allerdings haben veränderte Investitionskosten (+20%) und moderate Preissteigerungen bei den Chemikalien eine

Steigerung der Kosten von 37 % zur Folge. Aufgrund der fehlenden Aufschlüsselung der Daten für die großtechnische Umsetzung ist eine Sensitivitätsanalyse nicht möglich.

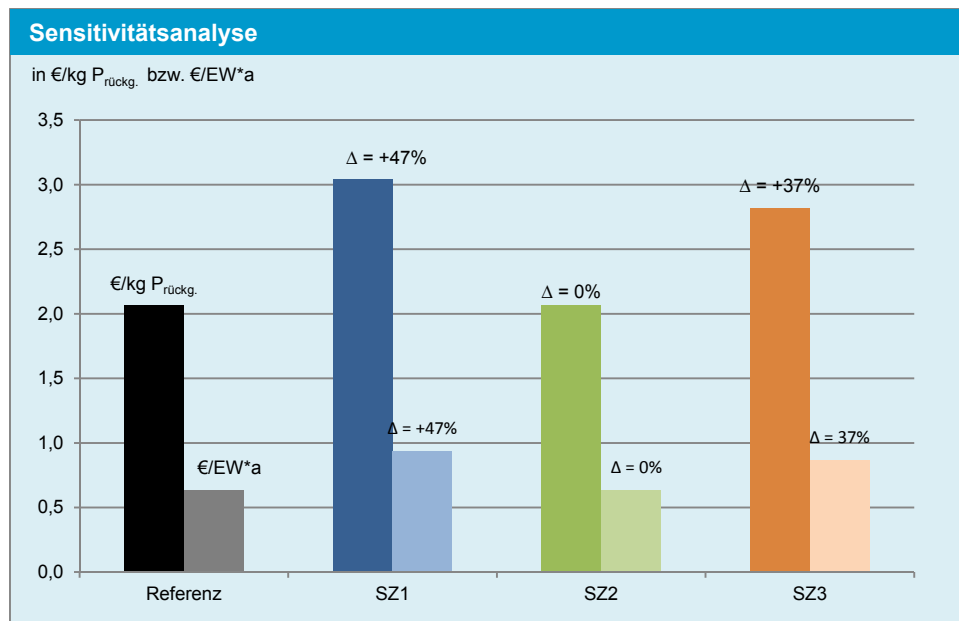


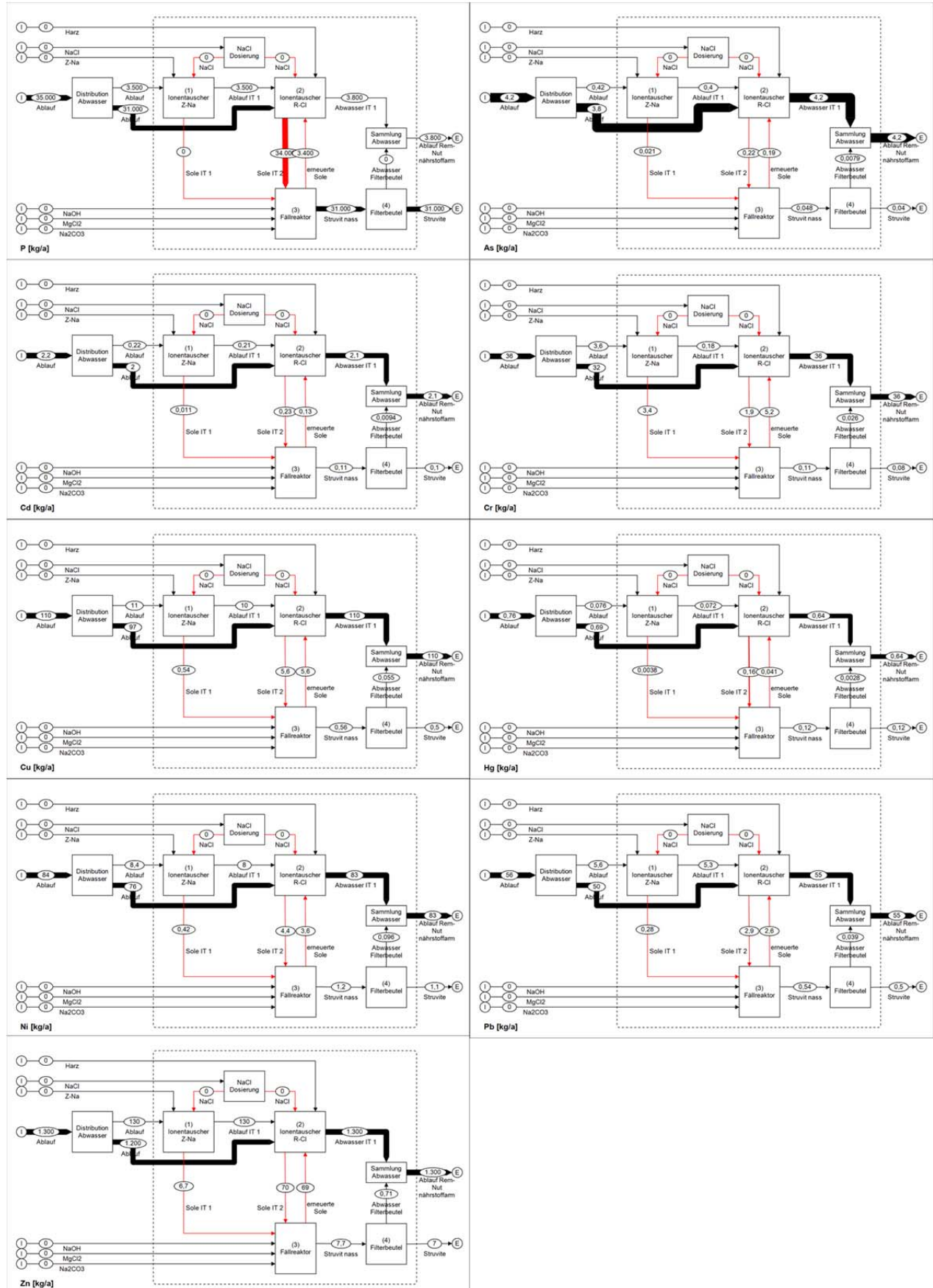
Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse REM-NUT®

1.3.5 Literatur

- Blaney, L.M., Cinar, S., SenGupta, A.K. (2007) Hybrid anion exchanger for trace phosphate removal from water and wastewater. *Water Research* 41, pp. 1603 - 1613
- Ishiwata, T., Miura, O., Hosomi, K., Shimizu, K., Ito, D., Yoda, Y. (2010) Removal and recovery of phosphorus in wastewater by superconducting high gradient magnetic separation with ferromagnetic adsorbent. *Physica C* 470, pp. 1818-1821
- Liberti, L., Petruzzelli, D., De Florio, L. (2001) REM NUT Ion Exchange Plus Struvite Precipitation Process. *Environmental Technology* Vol. 22 (11), pp. 1313-1324
- Liberti, L., Laricchiuta, A., Lopez, A., Passino, R. (1986a) The RIM-NUT process at West Bari for removal of nutrients from wastewater: First demonstration. *Resources and Conservation* 12, pp. 125-136
- Liberti, L., Limoni, N., Lopez, A., Passino, R. (1986b) The RIM-NUT process at West Bari for removal of nutrients from wastewater: Second demonstration. *Resources and Conservation* 15, pp. 95-111
- Liberti, L., Limoni, N., Lopez, A., Passino, R., Boari, G. (1986c) The 10 m³/h RIM-NUT demonstration plant at West Bari for removing and recovering N and P from wastewater. *Water Research* 20 (6), pp. 735-739.
- Petruzzelli, D., De Florio, L., Dell'Erba, A., Liberti, L., Notarnicola, M., Sengupta, A.K. (2003) A new phosphate-selective sorbent for the Rem Nut® process. Laboratory investigation and field experience at a medium size wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*. Vol 48 (1). pp. 179-184.

1.4 Anhang

1.4.1 Stoffflussanalyse REM-NUT®



1.4.2 Stoffflussanalyse Gesamtprozess REM-NUT®

