



MÖGLICHKEITEN DER  
WIEDERVERWERTUNG UND NUTZUNG  
VON KLÄRSCHLAMM IN DER MONGOLEI

2025

# BERICHT

Forschungsprojekt

# **MONGOLEI - STUDIENBERICHT ÜBER SCHLAMMRECYCLING UND - WIEDERVERWENDUNG**

**Erstellt von:** Ecologiin buteemj GmbH/ Ecological Productivity GmbH

**Im Auftrag von:** Deutsch-Mongolischer Unternehmensverband (DMUV)

**Berichtsdatum:** 1. September 2025

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Deutsche Bezeichnung
ADB	Asiatische Entwicklungsbank
ASTM	Amerikanische Gesellschaft für Prüfung und Materialkunde
BOD	Biochemischer Sauerstoffbedarf
MFUUK	Ministerium für Umwelt und Klimawandel
MCUD	Ministerium für Bauwesen und Stadtentwicklung
ABWASSERBEHANDLUNGSAKLAGE	Abwasserbehandlungsanlage
CBA	Kosten-Nutzen-Analyse
CFU	Koloniebildende Einheit
COD	Chemischer Sauerstoffbedarf
DMUV	Deutsch-Mongolischer Unternehmensverband
EC	Europäische Kommission
MH	Gesundheitsministerium
EU	Europäische Union
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GTAI	Germany Trade & Invest
ISO	Internationale Organisation für Normung
JICA	Japanische Agentur für internationale Zusammenarbeit
MASM	Mongolische Agentur für Normung und Metrologie
MCC	Millennium Challenge Corporation
MNS	Mongolische Nationale Norm
NDC	National festgelegter Beitrag (im Rahmen des UNFCCC)
CRACC	Bürgervertretung der Hauptstadt
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
PAM	Polyacrylamid
PPP	Öffentlich-private Partnerschaft
SDG	Ziele für nachhaltige Entwicklung
SWOT	Stärken, Schwächen, Chancen, Risiken
ZA	Zentrale Abwasserbehandlungsanlage
FS	Machbarkeitsstudie
TSS	Gesamte Schwebstoffe
UNDP	Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen
UNECE	Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa
UNFCCC	Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen
WUA	Wasser- und Abwasserentsorgungsbehörde
WB	Weltbank
WHO	Weltgesundheitsorganisation

# INHALT

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	3
EINLEITUNG .....	16
HINTERGRUND .....	19
I. ZUSAMMENFASSUNG .....	21
1.1. Begründung der Studie .....	21
1.2. Umfang und Methodik der Studie .....	21
1.2.1. Untersuchungsstandorte .....	21
1.3. Zentrale Ergebnisse .....	23
1.3.1. Organische Schadstoffe .....	23
1.4. Ökotoxikologische und biologische Bewertung .....	23
1.4.1. Pflanzentoxizitätstest (Helianthus annuus L.) .....	23
1.4.2. Mikrobiologische Bewertung .....	23
1.4.3. Ökotoxikologische Indikatoren .....	23
1.5. Integrierte Schlussfolgerung .....	24
II. EINLEITUNG .....	26
2.1. Aktueller Stand der Kläranlagen in der Mongolei .....	27
2.1.1. Struktur und Klassifizierung der Anlagen .....	27
2.1.2. Besonderheiten der Abwasserbehandlung in Ulaanbaatar .....	28
2.1.3. Aktueller Zustand des Schlammanagements .....	28
2.2. Abschätzung der Schlammanhäufung und Bewertung des Managements .....	29
2.2.1. Begründung .....	29
2.3. Struktur der Schlammerzeugung und -ansammlung in der Mongolei .....	30
2.4. Schlamakkumulation und Wachstumstrends in Ulaanbaatar .....	30
2.4.1. Frühere Studien und aktuelles Management .....	31
2.4.2. Einschränkungen, Chancen und internationale Trends .....	31
2.5. Demografie, Urbanisierung und Abwasserwachstum: Infrastrukturbedarf und Schlammaufkommen .....	32
2.5.2. Kapazität und Einschränkungen der technologischen Infrastruktur .....	33
2.5.3. Stadtplanung und zukünftige Belastungsrisiken .....	33
2.6. Forschungsziele und Untersuchungsrahmen .....	34
2.6.1. Allgemeines Ziel .....	34
2.6.2. Spezifische Ziele .....	34
2.6.3. Untersuchungsumfang .....	35
2.6.5. Berichtszeitplan und Liefergegenstände .....	36
2.7. Integrierte institutionelle Bewertung .....	36
2.7.1. Systemische Defizite und Herausforderungen der institutionellen Koordination: Analytische Bewertung .....	38
2.7.2. Notwendigkeit institutioneller Reformen .....	40
2.8. SWOT-Analyse der Akteure und politische Matrix .....	41
2.8.1. SWOT-Analyse der Stakeholder .....	41
2.8.2. Politische Matrix: Ziele, Maßnahmen, Zuständigkeiten .....	42
2.9. Informationslücken und Chancen für Pilotmodelle .....	43
2.9.1. Informationslücken und ihre Auswirkungen .....	43

2.9.2. Pilotmodelle und Umsetzungsmöglichkeiten .....	44
<b>III. POLITISCHE UND RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN .....</b>	<b>46</b>
3.1. Struktur und Kohärenz des nationalen Rechtsrahmens .....	46
3.1.1. Kohärenz und Schwächen nationaler Politikdokumente .....	46
3.1.2. Interinstitutionelle Politikkonflikte und Koordinationsprobleme .....	47
3.1.3. Politische Schlussfolgerungen und Entwicklungsrichtungen .....	47
3.2. Analyse internationaler rechtlicher Referenzrahmen und Normenkonformität .....	48
3.2.1. Allgemeine Bewertung und Geltungsbereich .....	48
3.2.2. Vergleichende regulatorische Bewertung .....	48
3.2.3. Vergleichende Analyse internationaler Regulierungsansätze .....	49
3.2.4. Bewertung der ökotoxikologischen und laborbezogenen Konformität .....	50
3.2.5. Auswirkungen auf Rechtsangleichung und Politik .....	50
3.2.6. Politikempfehlungen .....	51
3.2.7. Integrierte Bewertung - Zusammenfassung .....	51
3.3. Rechtliche Klassifizierung und Regulierungsrahmen für Abwasser- und Klärschlammmanagement .....	51
3.3.1. Bewertung des aktuellen rechtlichen Umfelds .....	51
3.3.2. Internationale Klassifizierungsansätze für das Schlammmanagement .....	52
3.3.3. Vorgeschlagenes mongolei-spezifisches Klassifikationssystem (S0-S3 + Integration von Class A/B) .....	52
3.3.4. Hierarchie des Schlammmanagements .....	53
3.4. Schwächen, Chancen und politische Empfehlungen für das rechtliche Umfeld .....	54
3.4.1. Aktuelles rechtliches Umfeld und institutionelle Struktur .....	54
3.4.2. SWOT-Analyse des rechtlichen Umfelds .....	55
3.4.3. GAP-Analyse des rechtlichen Umfelds .....	55
3.4.4. Defizite der institutionellen Koordination .....	56
3.4.5. Politischer Reformfahrplan .....	56
3.4.6. Erwartete politische Wirkungen und Ergebnisse .....	57
<b>IV. GEOCHIMISCHE ANALYSE .....</b>	<b>58</b>
4.1. Einführung in die Studie .....	58
4.1.1. Ziele der Studie .....	58
4.1.2. Wissenschaftlicher Ansatz und Methodik .....	58
4.1.3. Untersuchungsumfang .....	59
4.1.4. Grundlegende geochemische Mechanismen .....	59
4.1.5. Bedeutung der Studie .....	59
4.2. Geochemische Analyse: Methodik, Umfang und Labore .....	60
4.2.1. Zweck und Begründung der Studie .....	60
4.2.2. Umfang: Probenarten und Standortrepräsentation .....	60
4.2.3. Labore, die die Analysen durchgeführt haben .....	60
4.2.4. Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle (QA/QC) .....	61
4.3. Ergebnisse der geochemischen Analyse und Vergleich mit internationalen Standards .....	61
4.3.1. Basisparameter (pH, Feuchte, organische Substanz, Aschegehalt) .....	61
4.3.2. Schwermetallkonzentrationen - Vergleich mit MNS und EU-Standards .....	61

4.3.3. PAM und VOCs - restliche organische Schadstoffe .....	62
4.3.4. Standortbezogene Merkmale und geochemische Muster .....	62
4.3.5. Bedeutung der Ergebnisse .....	62
4.3.6. Vergleichende Schwermetallanalyse über 10 Standorte .....	63
4.3.7. Potenzieller ökologischer Risikoindex (RI) und geochemische Risikobewertung .....	66
4.3.8. Integrierte geochemische Schlussfolgerung.....	68
4.4. Auslaugungstests und Umwelt-Risikobewertung.....	69
4.4.1. Zweck und Begründung .....	69
4.4.2. Bio-Auslaugung (Bio-Leachability) .....	73
4.4.3. Leachability Risk Index (LRI) .....	73
4.4.4. GIS-hydrogeochemische räumliche Modellierung.....	73
4.5. Geo-Akkumulationsindex (Igeo), Anreicherungsfaktor (EF) und räumliche Risikokartierung.....	74
4.5.1. Zweck und Begründung .....	74
4.5.2. Angewandte Methoden.....	74
4.5.3. Berechnungsergebnisse .....	75
4.5.4. Vergleichende Ergebnisse nach Standort .....	75
4.5.5. Räumliche Bewertung .....	76
4.5.6. Geochemische Zusammenhänge (PCA und Korrelationsanalyse) .....	77
4.6. Vergleich internationaler Standards und Bewertung des regulatorischen Rahmens .....	78
4.6.1. Zweck und Begründung der Bewertung.....	78
4.7. Management hochriskanter Elemente: Arsen (As) und Chrom (Cr) .....	79
4.7.1. Herkunft und Akkumulation .....	79
4.8. Internationale Trends und Investitionsmöglichkeiten .....	80
<b>V. BIOLOGISCHE SICHERHEITSBEWERTUNG .....</b>	<b>82</b>
5.1. Bodenmikroorganismen und pflanzenbasierte Wirkungstests.....	82
5.1.1. Pflanzen-Bioassay -Modellpflanze Sonnenblume ( <i>Helianthus annuus</i> L.) .....	82
5.1.2. Toxizitätsreaktion und EC <sub>50</sub> -Bestimmung .....	84
5.1.3. Interpretation der Ergebnisse und wissenschaftliche Schlussfolgerungen.....	84
5.1.4. Allgemeine Empfehlungen.....	85
5.1.5. Bedeutung der Studie .....	85
5.1.6. Pflanzenwachstumsreaktion und EC <sub>50</sub> -Kurve .....	86
5.1.7. Metallakkumulation und Translokation in Pflanzen .....	90
C. Schema der Pflanze-Boden-Interaktion .....	92
5.1.8. Wissenschaftliche Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....	92
5.2. Erweiterte ökotoxikologische Bewertung .....	94
5.2.1. Zweck und wissenschaftliche Begründung .....	94
5.2.2. Auswirkungen auf das Boden-Mikroökosystem .....	94
5.2.3. Auswirkungen auf Pflanzen (OECD 208 Standard).....	95
5.2.4. Auswirkungen auf aquatische Organismen.....	95
5.2.5. Schwermetall-Auswaschbarkeit und Bioverfügbarkeit.....	96
5.2.6. Integrierter ökotoxikologischer Index (IETI + ETI) .....	96
5.2.7. Biochemische Bewertung der Schwermetallwirkungen .....	99

5.3. Risiken für die öffentliche Gesundheit und die Umwelt.....	99
5.3.1. Allgemeiner Hintergrund .....	99
5.3.2. Mikrobiologische Analyse (Biocombinat) .....	99
5.3.3. Direkte und indirekte Gesundheitsauswirkungen .....	100
5.3.4. Vergleich mit internationalen Standards .....	100
5.3.5. Anforderungen an Hygienisierung und Desinfektion.....	101
5.3.6. Integrierter Biohazard Index (BHI) .....	101
Monitoring-Anforderungen .....	102
5.4. Detaillierte Biosicherheitsbewertung von Abwasserbehandlungsanlagen .....	102
5.4.1. Zweck und Begründung .....	102
5.4.2. Untersuchte Abwasserbehandlungsanlagen .....	103
5.4.3. Integrierte Biosicherheitsbewertung.....	103
5.4.4. Interpretation und Klassifizierung der Risikostufen.....	104
5.4.5. Risikobasierte Managementempfehlungen .....	104
5.4.6. Internationale Benchmarks und der “One Health“-Ansatz .....	105
5.5. Integriertes Risikobewertungs- und Managementmodell .....	105
5.5.1. Zweck der Bewertung.....	105
5.5.2. Kriterien und Methodik .....	106
5.5.3. Integrierte Risiko-Matrix.....	106
5.5.4. Mehrstufiges Risikomanagement-Modell .....	107
5.5.5. Integriertes Managementmodell nach dem “One Health“-Ansatz .....	108
5.5.6. Institutionelle und regulatorische Koordination .....	108
VI. INGENIEURTECHNISCHE UND TECHNOLOGISCHE LÖSUNGEN .....	110
6.1. Deutsche technologische Lösungen und deren Anwendbarkeit in der Mongolei .....	110
6.1.1. Allgemeiner Überblick .....	110
6.1.2. Technische Machbarkeit der Nutzung von Klärschlamm in Baustoffen .....	111
6.2. Energierückgewinnungstechnologien .....	112
6.2.1. Allgemeiner Überblick .....	112
6.2.2. Direkte Verbrennung (Waste-to-Energy, WtE) .....	113
6.2.3. Anaerobe Vergärung (AD) und Biogasproduktion .....	114
6.2.4. Integriertes Energiegewinnungssystem (WtE + AD) .....	115
6.3. Technologien zur Bodenverbesserung und Landrehabilitation .....	116
6.3.1. Grundlegende Begründung .....	116
6.3.2. Bodenverbesserungstechnologien.....	117
6.3.3. Einsatz in der Bergbau-Rekultivierung .....	117
6.3.4. Bodenschutz- und Anti-Desertifikationsmaßnahmen.....	118
6.3.5. Umwelt- und Hygienekontrollen .....	118
6.3.6. Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit durch ökobiotechnologische Verfahren .....	118
6.3.7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....	118
6.4. Vermikompostierung und bioingenieurtechnische Verfahren .....	119
6.4.1. Allgemeine Übersicht.....	119
6.4.2. Grundprinzipien des Prozesses .....	119
6.4.3. Biochemische Mechanismen.....	119

6.4.4. Produkte und Qualitätskennzahlen .....	120
6.4.5. Technische Lösungen und Systemdesigns .....	120
6.4.6. Anpassung an mongolische Bedingungen .....	121
6.5. Technologischer Vergleich und Bewertung.....	123
6.5.1. Ziel der Bewertung .....	123
6.5.2. SWOT-Analyse.....	123
2. Anaerobe Vergärung (AD, Biogastechnologie) .....	124
3. Baumaterialien (Nutzung von Klärschlammmasche) .....	124
4. Bodenverbesserung & Landrehabilitierung.....	124
6.5.3. Ingenieurtechnische Strategie für die Mongolei .....	127
6.5.4. Wirtschaftliche und gesellschaftliche Auswirkungen .....	127
6.5.5. Übereinstimmung mit der nationalen Umweltpolitik .....	127
6.5.6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....	127
2. Stärkung von Standards und Risikomanagement .....	127
3. Einführung wirtschaftlicher Anreize .....	128
VII. WIRTSCHAFTS- UND MARKTBEWERTUNG .....	129
7.1. Kostenvergleich: Schlammrecycling vs. derzeitige Entsorgungspraxis .....	129
7.1.1. Aktueller Status und Kostenstruktur .....	129
7.1.2. Umwelt- und soziale “versteckte Kosten” .....	129
7.1.3. Kosten-Nutzen-Vergleich der Recyclingtechnologien.....	129
7.1.4. Kosten-Nutzen-Analyse pro 1 m <sup>3</sup> Klärschlamm.....	130
7.1.5. Wertschöpfungskette & wirtschaftliches Potenzial .....	130
7.1.6. Finanzielle Analyse: ROI und Amortisation.....	130
7.1.7. Integriertes Modell der wirtschaftlichen Gesamtauswirkungen .....	131
7.1.8. Schlussfolgerung.....	132
7.2. Marktchancen in der Mongolei und Exportpotenzial.....	132
7.2.1. Allgemeiner Marktkontext .....	132
7.2.2. Inländische Marktchancen .....	133
7.2.3. Exportchancen.....	134
7.2.4. Kombinierte Marktanalyse.....	134
7.2.5. Schlussfolgerung.....	134
7.3. Regionale Logistik, Infrastruktur und Kostenoptimierung .....	135
7.3.1. Allgemeiner Hintergrund .....	135
7.3.2. Kostenstruktur des Klärschlammtransports .....	135
7.3.3. Optimierung der Standortwahl.....	135
7.3.4. Technisches Layout für bestehende Kläranlagen .....	136
7.3.5. Dreistufiges integriertes Logistiksystem .....	136
7.3.6. Kostenoptimierung bei der Standortwahl.....	137
7.3.7. Empfohlene Infrastrukturverbesserungen .....	137
7.3.8. Schlussfolgerungen und strategische Empfehlungen .....	137
7.4. Niedrigkosten-Technologieoptionen und lokale Umsetzungsmodelle .....	137
7.4.1. Ziel und Begründung .....	137
7.4.2. Lokales ingenieurtechnisches Umsetzungsmodell .....	138

7.4.3. Infrastrukturintegration und gemeinsames Management.....	138
7.4.4. Soziale und ökologische Vorteile .....	139
7.5. Finanzmodellierung (NPV, IRR, ROI) .....	139
7.5.1. Ziel der Finanzmodellierung.....	139
7.5.2. Zentrale Finanzformeln .....	140
7.5.3. Vergleichende wirtschaftliche Bewertung der Technologieoptionen .....	141
7.5.4. Cashflow-Modellierung .....	141
7.5.5. Sensitivitätsanalyse.....	142
7.5.6. Kombinierte wirtschaftliche Auswirkungen .....	142
7.5.7. Finanzpolitische Empfehlungen .....	142
7.5.8. Abschließende Gesamtbewertung .....	142
<b>VIII. POLITISCHE EMPFEHLUNGEN UND STRATEGISCHER UMSETZUNGSRAHMEN</b>	
.....	144
8.1. Übergeordnetes Ziel .....	144
8.2. Aktueller Rechts- und Regulierungsrahmen.....	144
8.3. Nationale Politikziele (2025-2035) .....	144
8.4. Strategische Ausrichtungen .....	145
8.5. Umsetzungsfahrplan (2025-2035).....	145
8.6. Risikomanagement-Rahmen .....	146
8.7. Erwartete sozioökonomische Ergebnisse .....	146
8.8. Gesamtschlussfolgerung und Empfehlungen.....	146
8.9. Zeitplan der politischen Umsetzung (Abbildungsbeschreibung) .....	146
8.10. Risiko-Bewertungsmatrix .....	147
8.11. Schlussfolgerung .....	148
<b>IX. UMWELTAUSWIRKUNGSBEWERTUNG</b> .....	150
9.1. Gesamtzielsetzung .....	150
9.2. Standort der bewerteten Anlagen .....	150
9.3. Modellierung der geruchsausbreitung .....	157
9.3.1. Zielsetzung der Untersuchung .....	157
9.3.2. Windregime und seine Beziehung zur Geruchsausbreitung .....	157
9.3.3. Ergebnisse der AERMOD-Modellierung.....	159
9.4. Umfassende Umweltwirkungsanalyse .....	162
9.4.1. Methodik .....	162
9.4.2. Ökologische Zonierung des Tuul-Flusses (ArcGIS) .....	163
Schlussfolgerungen .....	163
<b>INTEGRIERTE SCHLUSSFOLGERUNG</b> .....	169
<b>LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS</b> .....	172
<b>ANHANG 1</b> .....	175
<b>ANHANG 2</b> .....	177
<b>ANHANG 3</b> .....	179

# TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1. Analytische Methoden .....	22
Tabelle 2. Geochemische Analyseergebnisse .....	23
Tabelle 3. Standortbezogene Risikoeinstufung .....	24
Tabelle 4. Technologische und wirtschaftliche Bewertung .....	24
Tabelle 5. Bewertung: Regulierung, Normen und Politik .....	24
Tabelle 6. A. Klassifizierung der Schlammquellen und durchschnittliche Jahresmengen (2025) .....	30
Tabelle 7. Schlammarten und Wachstumstrends .....	30
Tabelle 8. Übersicht früherer Studien .....	31
Tabelle 9. Zentrale Institutionen im Schlammanagement und ihre Rollen .....	37
Tabelle 10. SWOT-Analyse der wichtigsten Stakeholder .....	41
Tabelle 11. Politische Matrix .....	42
Tabelle 12. Informationslücken und deren Auswirkungen .....	43
Tabelle 13. Pilotmodelle .....	44
Tabelle 14. Empfehlungen und erforderliche Maßnahmen .....	45
Tabelle 15. Politische Dokumente und ihre Relevanz für das Schlammanagement .....	46
Tabelle 16. Vergleichende normative Bewertung .....	48
Tabelle 17. Analyse der Laborkonformität .....	50
Tabelle 18. Politikempfehlungen .....	51
Tabelle 19. Vergleich internationaler Klassifikationssysteme .....	52
Tabelle 20. Vorgeschlagenes nationales Klassifikationssystem .....	52
Tabelle 21. Vorgeschlagene rechtliche Reformen .....	54
Tabelle 22. Risiko- und wirtschaftliche Bewertung .....	54
Tabelle 23. Politische Dokumente .....	55
Tabelle 24. SWOT-Analyse .....	55
Tabelle 25. GAP-Analyse .....	55
Tabelle 26. Institutionelle Koordination .....	56
Tabelle 27. Erwartete Wirkungen (2025-2030) .....	57
Tabelle 28. Analytische Methoden und verwendete Standards .....	60
Tabelle 29. Basisparameter der Schlammproben .....	61
Tabelle 30. Schwermetallkonzentrationen .....	61
Tabelle 31. Restschadstoffe (PAM, VOCs) .....	62
Tabelle 32. Standortbezogene Beobachtungen .....	62
Tabelle 33. Vergleichende Konzentrationen von Schwermetallen in Klärschlammproben (mg/kg) .....	63
Tabelle 34. Räumliche Verteilung der geochemischen Bewertung .....	65
Tabelle 35. Ökotoxikologische Bewertung und Nutzungsoptionen .....	65
Tabelle 36. Risikoklassifizierung .....	67
Tabelle 37. Ergebnisse des ökologischen Risikos .....	67
Tabelle 38. Standortbezogene ökologische Risikokategorien .....	68
Tabelle 39. Verwendete analytische Methoden .....	69
Tabelle 40. Ergebnisse des TCLP-Auslaugungstests (mg/L) .....	70
Tabelle 41. Ergebnisse der Bio-Auslaugung .....	73
Tabelle 42. Berechnung des Leachability Risk Index (LRI) .....	73
Tabelle 43. Standortcharakteristika .....	73
Tabelle 44. Managementempfehlungen .....	74
Tabelle 45. Geo-Akkumulationsindex (Igeo) .....	74
Tabelle 46. Anreicherungsfaktor (EF) .....	75
Tabelle 47. Geoakkumulationsindex (Igeo) und Anreicherungsfaktor (EF) - Gesamtmittelwerte .....	75
Tabelle 48. Vergleich Igeo und EF Werte nach Standort .....	75
Tabelle 49. Räumlicher Umfang der Anreicherung und Akkumulation für As, Cr und Cd .....	76

Tabelle 50. Hauptkomponentenanalyse (PCA): Elementgruppierung und Quelleninterpretation .....	77
Tabelle 51. Vergleichte Standards .....	78
Tabelle 52. Vergleich der durchschnittlichen geochemischen Parameter.....	78
Tabelle 53. Vergleich der regulatorischen Rahmenbedingungen .....	79
Tabelle 54. Risiko- und wirtschaftliche Auswirkungen.....	80
Tabelle 55. Technische Lösungen .....	80
Tabelle 56. Weltweite Trends .....	80
Tabelle 57. Investitionsbewertung.....	80
Tabelle 58. Versuchsdesign .....	82
Tabelle 59. Messgrößen und Methoden.....	83
Tabelle 60. Wachstumsparameter.....	84
Tabelle 61. Metallakkumulation .....	84
Tabelle 62. Einfluss der Schlammkonzentration auf die Blattpsiologie .....	88
Tabelle 63. A. Anreicherung von Schwermetallen in Pflanzengeweben ( $\mu\text{g/g TS}$ ) .....	90
Tabelle 64. Empfehlungen .....	92
Tabelle 65. Eignung verschiedener Phytosanierungspflanzen .....	93
Tabelle 66. Vergleichende durchschnittliche Phytosanierungsleistung.....	93
Tabelle 67. Reaktion der mikrobiellen Atmung.....	94
Tabelle 68. Reaktion der mikrobiellen Diversität.....	95
Tabelle 69. TCLP-Auslaugung (EPA 1311).....	96
Tabelle 70. Übersicht der ökotoxikologischen Ergebnisse und wissenschaftliche Interpretation.....	96
Tabelle 71. Ergebnisse der Ökotoxizitätstests .....	97
Tabelle 72. Vergleichende Bewertung der Schwermetallkonzentrationen .....	99
Tabelle 73. Mikrobiologische Testergebnisse des häuslichen Abwassers .....	99
Tabelle 74. Risikokategorien .....	100
Tabelle 75. Vergleich mit internationalen Sicherheitsstandards.....	100
Tabelle 76. Anforderungen an Hygienisierung und Behandlung.....	101
Tabelle 77. Bewertete Anlagen.....	103
Tabelle 78. Zusammenfassung der Biosicherheitsbefunde .....	103
Tabelle 79. Biosicherheitsrisikostufen.....	104
Tabelle 80. Internationaler Vergleich .....	105
Tabelle 81. Klassifizierung der Risikostufen.....	106
Tabelle 82. Integrierte Risikomatrix .....	106
Tabelle 83. Eigenschaften der Schlammquellen .....	107
Tabelle 84. Mehrstufiges Risikomanagement.....	107
Tabelle 85. Institutionelle Koordination .....	108
Tabelle 86. Zuständige Regulierungsbehörden.....	108
Tabelle 87. Wirtschaftliche und soziale Vorteile.....	109
Tabelle 88. Vergleich führender deutscher Unternehmen und Technologien.....	110
Tabelle 89. Chemische Zusammensetzung von Klärschlamm-Asche .....	111
Tabelle 90. Umwelt- und Wirtschaftsbewertung .....	112
Tabelle 91. Ingenieurtechnische Empfehlung für die Mongolei .....	112
Tabelle 92. Schlüsselparameter eines WtE-Systems .....	114
Tabelle 93. Betriebsparameter .....	114
Tabelle 94. Empfohlene ingenieurtechnische Modelle für Regionen der Mongolei.....	115
Tabelle 95. Wirtschaftlichkeitsberechnung (für 1.000 m <sup>3</sup> Klärschlamm).....	115
Tabelle 96. Ingenieurtechnische Verfahren zur Bodenverbesserung .....	117
Tabelle 97. Bodenverbesserung nach 5 % Klärschlammzugabe.....	117
Tabelle 98. Ablaufplan der Umsetzung .....	117
Tabelle 99. Technologien zur Bekämpfung der Desertifikation .....	118
Tabelle 100. Monitoringparameter .....	118

Tabelle 101. Ökobiotechnologische Lösungen .....	118
Tabelle 102. Mechanismen des Abbaus organischer Substanz.....	119
Tabelle 103. Leistung des Vermikomposts (Pilotversuch) .....	120
Tabelle 104. Kleinsysteme (Betriebsebene) .....	120
Tabelle 105. Mittlere Systeme (institutionelle Ebene).....	120
Tabelle 106. Lokalisierte technische Lösungen .....	121
Tabelle 107. Analyse pro Tonne Schlamm.....	121
Tabelle 108. Übersicht.....	121
Tabelle 109. Haupttechnologien der Bewertung.....	123
Tabelle 110. SWOT-Analyse.....	124
Tabelle 111. Technologie-Bewertung (Punkte 1-10).....	125
Tabelle 112. Empfohlene Technologieverteilung .....	127
Tabelle 113. Gesamtwirkungen .....	127
Tabelle 114. Direkte Kosten der derzeitigen Schlammensorgung.....	129
Tabelle 115. Geschätzte externe Kosten .....	129
Tabelle 116. Wirtschaftlicher Vergleich wichtiger Recyclingoptionen .....	129
Tabelle 117. Wirtschaftliche Leistung pro 1 m <sup>3</sup> .....	130
Tabelle 118. Einnahmequellen in Wertschöpfungsketten.....	130
Tabelle 119. Beispiel: Verarbeitung von 100.000 m <sup>3</sup> Klärschlamm.....	131
Tabelle 120. Treiber der grünen Marktnachfrage .....	133
Tabelle 121. Marktindikatoren für Baustoffe .....	133
Tabelle 122. Marktchancen im Düngemittelsektor .....	133
Tabelle 123. Wirtschaftliche Bewertung von Biogas .....	133
Tabelle 124. Exportfähige Produkte aus Schlammverwertung .....	134
Tabelle 125. Risiken und Minderungsmaßnahmen.....	134
Tabelle 126. Geschätzte Marktgröße .....	134
Tabelle 127. Einheitlicher Transportkostenaufwand für Klärschlamm .....	135
Tabelle 128. Kriterien der Standortauswahl .....	135
Tabelle 129. Mongolisches Drei-Ebenen-Logistiksystem .....	136
Tabelle 130. Wirtschaftlicher Vergleich von drei Standortoptionen .....	137
Tabelle 131. Infrastrukturmaßnahmen .....	137
Tabelle 132. Haupttechnologieoptionen .....	137
Tabelle 133. Wirtschaftlicher Vergleich (pro 1 m <sup>3</sup> Schlamm).....	138
Tabelle 134. Rollen und Verantwortlichkeiten .....	139
Tabelle 135. Erwartete Auswirkungen .....	139
Tabelle 136. Finanzielle Bewertung der Technologieszenarien (10-Jahres-Modell).....	141
Tabelle 137. Cashflow-Modell .....	141
Tabelle 138. Cashflow-Modell .....	141
Tabelle 139. Sensitivität zentraler Variablen .....	142
Tabelle 140. Jährliche wirtschaftliche Effekte .....	142
Tabelle 141. Bestehende Gesetze, Standards und deren Abdeckung.....	144
Tabelle 142. "Nationales Programm zur Nutzung von Schlammressourcen" (2025-2035).....	144
Tabelle 143. Institutioneller Rahmen .....	145
Tabelle 144. Politik zur Technologieentwicklung .....	145
Tabelle 145. Wirtschafts- und Finanzierungsmaßnahmen .....	145
Tabelle 146. Reform der Standards und Überwachung .....	145
Tabelle 147. Phasenplan .....	145
Tabelle 148. Maßnahmen zum Risikomanagement .....	146
Tabelle 149. Erwartete Ergebnisse (2025-2035).....	146
Tabelle 150. Umsetzungszeitplan (2025-2035) .....	146
Tabelle 151. Risiko-Bewertungsmatrix .....	147

Tabelle 152. Geografische Koordinaten der bewerteten Abwasseranlagen.....	150
Tabelle 153. In AERMOD verwendete Eingabeparameter.....	157
Tabelle 154. Beziehung zwischen Windrichtung und Schadstoffausbreitung.....	157
Tabelle 155. Monatliche Häufigkeit der Windrichtungen (%) - UB Station .....	158
Tabelle 156. Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Ausbreitung.....	158
Tabelle 157. Starkwindereignisse und Risiko.....	159
Tabelle 158. Konzentration der geruchsaktiven Stoffe.....	159
Tabelle 159. Feldmessungen geruchsaktiver Stoffe nach Standort.....	160
Tabelle 160. Bewertung der Bodenbelastung .....	162
Tabelle 161. Wasserqualitätsindikatoren .....	162
Tabelle 162. Rückgang der Biodiversität.....	163
Tabelle 163. Ergebnisse der ökologischen Zonierung .....	163
Tabelle 164. Zusammengesetzter Umwelt-Risikoindex (ERI) .....	167
Tabelle 165. Empfehlungen zur Geruchs- und Umweltkontrolle sowie zur ökologischen Wiederherstellung .....	167
Tabelle 166. Risikoabschätzung .....	170
Tabelle 167. Gap-Analyse gegenüber internationalen Standards .....	171

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1. Prognose des Bevölkerungs- und Abwasserwachstums in Ulaanbaatar .....	33
Abbildung 2. Standortvergleich .....	76
Abbildung 3. Investitions- und Kostenstruktur .....	81
Abbildung 4. Experimenteller Versuchsaufbau .....	83
Abbildung 5. Keim- und frühe Wachstumsphasen (Tage 0-45) (A-1, B-1, C-1: Keimphase; A-2, B-2, C-2: vegetative Phase; A-3, B-3, C-3: erweiterte Vegetationsphase) .....	86
Abbildung 6. Pflanzenwachstums-Reaktionskurve .....	87
Abbildung 7. Normalisierte Wachstumsrate (%) von <i>Helianthus annuus</i> in Abhängigkeit von der Schlammkonzentration .....	87
Abbildung 8. Zusammenhang zwischen Chlorophyllindex (SPAD) und Schlammkonzentration .....	88
Abbildung 9. Phytosanierungstest mit <i>Helianthus annuus</i> (21 Tage) .....	92
Abbildung 10. Ökotoxikologische Bewertung .....	98
Abbildung 11. Integrierte Risikobewertung .....	107
Abbildung 12. HUBER-Schlammwässerungssystem (Quelle: HUBER SE) .....	111
Abbildung 13. Schematischer Gesamtprozess der Klärschlammverbrennung .....	113
Abbildung 14. Vermikompostierungsprozess .....	122
Abbildung 15. Ökologische Vermikompostierung von Klärschlamm: Umwandlung von Abfall in hochwertigen Dünger zum Nutzen von Boden, Pflanzen und Mensch .....	122
Abbildung 16. Vergleich zwischen Kompost und Vermikompost .....	123
Abbildung 17. SWOT analyse .....	125
Abbildung 18. Vergleichende Bewertung der technologischen Lösungen .....	126
Abbildung 19. Vergleichende Analyse der Klärschlammbehandlungstechnologien .....	126
Abbildung 20. Eduktion des Klärschlammvolumens und Wirtschaftsanalyse .....	131
Abbildung 21. Economic Comparison: Waste or Resource (per 1 m <sup>3</sup> of sludge) .....	132
Abbildung 22. Finanzanalyse der Investitionsoptionen für Schlammbehandlungstechnologien .....	143
Abbildung 23. Untersuchungsstandorte .....	156
Abbildung 24. Diagramm der Windrichtungsverteilung .....	158
Abbildung 25. Analyse der Zyklonalaktivität (Cyclogenesis Analysis) .....	159
Abbildung 26. Geruchsausbreitungsmodellierung mit AERMOD .....	161
Abbildung 27. ARC-GIS-Karte der Risikopufferzonen des Tuul-Flusses .....	167
Abbildung 28. Stadtweite Geruchsausbreitung aus den KA-Anlagen .....	168
Abbildung 29. Neue Zentrale Abwasserreinigungsanlage (ABWASSERBEHANDLUNGSANLAGE) .....	179
Abbildung 30. Schlammtröcknungsbecken der neuen und alten zentralen Abwasserreinigungsanlage .....	179
Abbildung 31. Schlammtröcknungsbereich der Abwasserreinigungsanlage Biokombinat .....	180
Abbildung 32. Schlammtröcknungsbereich der Abwasserreinigungsanlage Moringiin Davaa .....	180
Abbildung 33. Industrieabwasserreinigungsanlage der MCS Coca-Cola .....	181
Abbildung 34. Zentrale Abwasserreinigungsanlage Darkhan .....	181
Abbildung 35. Schlammablagerngsfläche der Petro Matad GMBH .....	182

## GRAFIKVERZEICHNIS

Grafik 2. TCLP Auslaugungstesterebnisse-As .....	70
Grafik 3. TCLP Auslaugungstesterebnisse-Cr .....	71
Grafik 4. TCLP Auslaugungstesterebnisse-Pb .....	71
Grafik 5. EPA-Grenzwerte: As = 5,0; Cr = 5,0; Pb = 5,0 mg/L (alle gemessenen Werte liegen unterhalb der Grenzwerte) .....	72
Grafik 6. Ergebnisse des TCLP-Auslaugungstests .....	72
Grafik 7. Experimenteller Verlauf von <i>Helianthus annuus</i> (Visuelle Überwachung) .....	89
Grafik 8. Phytosanierungsleistung .....	90
Grafik 9. Bewertung der biologischen Sicherheit und Ergebnisse des Pflanzen-Bioassays .....	91

## 1. GEWICHTS- UND MESSEINHEITEN

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>
cm	Zentimeter
dB(A)	dB(A) - A-bewerteter Schalldruckpegel
ha	Hektar
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde
m	Meter
mm	Millimeter
m/s	Meter pro Sekunde
m <sup>2</sup>	Quadratmeter (Fläche)
m <sup>3</sup>	Kubikmeter (Volumen)
mg/L	Milligramm pro Liter (Wasserqualitätsindikator)
mg/m <sup>3</sup>	Milligramm pro Kubikmeter (Luftqualitätsindikator)
mg/Nm <sup>3</sup>	Milligramm pro Normkubikmeter (Standardbedingungen)
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
°C	Grad Celsius

## 2. GEOCHEMISCHE ANALYSEPARAMETER VON KLÄRSCHLAMM

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Anwendung</b>
%TS	Gesamtrockensubstanz (Total Solids)	Trockenschlammmenge und Feuchtigkeitsanteil
%VS	Flüchtige Feststoffe (Volatile Solids)	Organischer Gehalt, Biogaspotenzial
mg/kg	Konzentration in Feststoffproben	Schwermetalle, organische Schadstoffe
g/kg	Zusammensetzung von Feststoffen	Mineralgehalt, organische Substanz
mg/g	Mikrokonzentration	Mikroplastik, PAM-Rückstände
mS/cm	Elektrische Leitfähigkeit	Salzgehalt, Mineralisierung
%OM	Gehalt an organischer Substanz	Bodenverbesserung, Kompostanalyse
Bq/kg	Radioaktive Aktivität	Bergbauschlamm, öliger Schlamm
L/kg	Auslaugbarkeit (Leachability Ratio)	TCLP-Test, Auswaschungsverhalten
EU/m <sup>3</sup>	Geruchseinheiten	Geruchsbewertung bei Kläranlagen
MJ/kg	Heizwert	Energiegehalt von getrocknetem Schlamm
µm	Mikrometer	Mikroplastik- und Partikelgrößenverteilung
CFU/g	Koloniebildende Einheiten	Mikrobiologische Belastung

## EINLEITUNG

In der Mongolei erzeugen zentrale und regionale Abwasserbehandlungsanlagen jährlich zwischen **150.000 und 180.000 Tonnen Klärschlamm** - ein Volumen, das die nationale Kapazität hinsichtlich technischer Infrastruktur, Laboranalytik und Risikomanagementsysteme deutlich übersteigt. Die Zusammensetzung des Klärschlammes variiert erheblich in Bezug auf physikalische, chemische, biologische und ökotoxikologische Eigenschaften. Er enthält sowohl wertvolle Bestandteile (organische Substanz, Nährstoffe, Aschemineralien) als auch gefährliche Stoffe (Schwermetalle, organische Schadstoffe, Krankheitserreger und antibiotikaresistente Mikroorganismen) und stellt somit einen komplexen Abfallstrom mit doppelfunktionalem Charakter dar.

### POSITIVE ASPEKTE UND RESSOURCENNUTZEN DES KLÄRSCHLAMMS

Bei sachgemäßer Behandlung kann Klärschlamm als erneuerbare Ressource für verschiedene Anwendungen dienen, darunter:

- hoher Gehalt an organischer Substanz
- Stickstoff- und Phosphorreserven
- biologisch aktive Verbindungen
- Bioenergiequellen (Biogas, Pyrolysekohle)
- Rohstoff für die Zementproduktion
- Bodenverbesserer und Rekultivierungsmaterial

Diese Einsatzmöglichkeiten entsprechen den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft und ressourceneffizienten Nutzung.

### NEGATIVE ASPEKTE UND RISIKOEIGENSCHAFTEN DES KLÄRSCHLAMMS

Ohne ausreichende Behandlung stellt Klärschlamm eine erhebliche Gefahr für Umwelt und öffentliche Gesundheit dar.

#### **Schwermetalle:**

- As, Cr, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd → reichern sich im Boden und Wasser an und gelangen in die Nahrungskette.

#### **Organische und neue Schadstoffe:**

- PAK, VOC, Phthalate, Phenole
- Flockungshilfsmittelrückstände (PAM)
- Mikroplastik

#### **Biologische Gefahren (Pathogene + ARB/ARG):**

- *E. coli*, *Enterococcus spp.*, *Salmonella spp.*, *Clostridium perfringens*
- Helminthen-Eier
- Viren (Adenovirus, Enterovirus)
- Antibiotikaresistente Bakterien (ARB) und Resistenzen (ARG)

Diese Schadstoffe können:

- das mikrobiologische Gleichgewicht im Boden stören
- aquatische Ökosysteme schädigen

- das Risiko zoonotischer Krankheiten erhöhen
- die Lebensmittelsicherheit beeinträchtigen
- langfristige ökologische Belastungen verursachen

## AKTUELLER STAND DES KLÄRSCHLAMM MANAGEMENTS IN DER MONGOLEI

Derzeit erfolgt die Entsorgung von Klärschlamm in der Mongolei überwiegend durch:

- Freilufttrocknung
- Vergrabung im Boden
- Einleitung in Versickerungsfelder
- Lagerung ohne technische Behandlung

Diese Praktiken führen zu:

- ✓ Schwermetallanreicherung im Boden
- ✓ Nitrat- und mikrobiologischer Belastung des Grundwassers
- ✓ Vermehrung pathogener Keime und Biohazard-Hotspots
- ✓ Geruchsbelastung und flüchtige organische Verbindungen
- ✓ BSL-2-/BSL-3-Biosicherheitsrisiken in Schlammfeldern

Solche Schadstoffe bergen ein hohes Risiko, sich in Böden und aquatischen Ökosystemen anzureichern, in die Nahrungskette einzutreten und letztlich erhebliche Risiken für die öffentliche Gesundheit zu verursachen.

Aufgrund des Fehlens eines nationalen Systems zur Behandlung, Wiederverwendung, Klassifizierung und Zertifizierung von Klärschlamm wird dieser weiterhin durch Freilufttrocknung, Vergrabung im Boden sowie direkte Einleitung in Versickerungsfelder entsorgt. Dies hat Umweltprobleme wie die Anreicherung von Schwermetallen, die Verunreinigung des Grundwassers, mikrobielle Belastungen und erhebliche Geruchsbelästigungen in Ulaanbaatar, der Provinz Darkhan-Uul und Choibalsan weiter verschärft.

## INTERNATIONALE TRENDS VS. RÜCKSTAND DER MONGOLEI

### Europäische Union (EU-Richtlinie 86/278/EWG):

- Strenge Grenzwerte für Metalle und Pathogene
- Obligatorische ökotoxikologische Bewertungen

### Vereinigte Staaten (US EPA 503):

- Kategorien: Klasse A (vollständig hygienisiert), Klasse B (eingeschränkte Nutzung)
- Regelmäßige Überwachung: Pathogene, Auslaugverhalten, Metalle, Biohazards

### Japan und Südkorea:

- 70-80 % des Schlamms werden thermisch behandelt oder in Zementwerken verwertet
- Nationale Strategie "Kein unbehandelter Klärschlamm"

## ZENTRALE DEFIZITE IN DER MONGOLEI

- **Veraltete Normen:** MNS 5850:2019 und MNS 5668:2006 berücksichtigen keine Ökotoxizität, ARG/ARB, VOC oder Mikroplastik.
- **Begrenzte Laborkapazitäten:** Kaum ISO/IEC 17025-akkreditierte Labore vorhanden.

- **Technologiemangel:** Keine Nutzung von thermischen Verfahren, Biogassystemen, Pyrolyse oder Klärschlamm-Zementverwertung.
- **Schwache Hygienekontrolle:** Keine nationale Überwachung antibiotikaresistenter Keime.
- **Fehlende Investitionsanreize:** Keine wirtschaftlichen Mechanismen zur Förderung der Wiederverwendung.

Diese Defizite machen das Schlammmmanagement zu einer bedeutenden **Umweltrisikoquelle**.

## **ZIEL UND HAUPTMERKMALE DER STUDIE**

Diese Studie stellt die **erste integrierte Bewertung** von Klärschlamm in der Mongolei dar und umfasst:

- geochemische Analyse
- biologische Sicherheitsbewertung
- ökotoxikologische Tests
- integrierte Risikomodellierung (ERI, EI, R-Index)
- technologische und wirtschaftliche Bewertung
- Vorschläge zur Normen- und Politikreform

**Die Ergebnisse dienen als Grundlage für:**

- politische und regulatorische Entscheidungen
- Auswahl geeigneter Behandlungstechnologien
- Vorbereitung von Investitionsvorhaben
- Entwicklung neuer MNS-Normen
- Aufbau eines nationalen Programms “Klärschlamm als Ressource“

## HINTERGRUND

Das Management von Klärschlamm ist nicht nur eine abfallbezogene Thematik, sondern eine komplexe Querschnittsaufgabe, die unmittelbar mit Umweltschutz, dem Übergang zur grünen Wirtschaft, der öffentlichen Gesundheit, technologischer Innovation, Stadtentwicklung und der Klimapolitik verbunden ist. Eine sachgerechte Klärschlammbehandlung ist entscheidend für:

- die Reduzierung von Treibhausgasemissionen,
- die Erzeugung neuer erneuerbarer Energiequellen,
- die Verringerung der Abhängigkeit von importierten Baustoffen,
- die Eindämmung der Bodenverschlechterung und Wasserverschmutzung.

## POLITISCHE RAHMENBEDINGUNGEN DER MONGOLEI

- **“Vision - 2050“** - Prinzipien der Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft
- **Grüne Entwicklungsstrategie (2022-2030)** - Wiederverwertung von Abfällen, Emissionsminderung
- **SDG-2030, Ziel 6.3** - sichere Behandlung und Wiederverwendung von Abwasser und Klärschlamm
- **NDC-2030** - Emissionsminderung durch thermische Verwertung und Biogasproduktion
- **Abfallgesetz (2023)** - Klassifikationsbasiertes Abfallmanagement

Trotz dieser politischen Zielsetzungen fehlen der Mongolei wissenschaftliche Basisdaten und international abgestimmte Risikobewertungen, die eine ressourcenorientierte Nutzung von Klärschlamm unterstützen würden.

## ÜBERGEORDNETES ZIEL DER STUDIE

Ziel dieser Studie ist es, die Zusammensetzung, ökotoxikologischen Eigenschaften und Risikopotenziale von Klärschlamm aus zentralen, regionalen und industriellen Abwasserbehandlungsanlagen in der Mongolei zu erfassen und die Machbarkeit und Risiken der Wiederverwendung auf Basis internationaler Standards wissenschaftlich zu bewerten.

## SPEZIFISCHE ZIELE

### 1. Geochemische Analyse

- Schwermetalle: As, Cr, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd
- Organische Rückstände: PAK, VOC
- Flockungshilfsmittel: PAM
- Mikroplastik und organische Schadstoffe → Bewertung gemäß MNS / EU / EPA-Normen.

### 2. Ökotoxikologische und biologische Bewertung

- Pflanzenbasierte Bioassays (*Helianthus annuus*)
- Aquatische Organismen
- Bodenmikrobiologische Tests und Toxizitätsmessungen → EC<sub>50</sub>, LC<sub>50</sub> und biologisches Sicherheitsniveau.

### **3. Integrierte Risikomodellierung (ERI)**

- Igeo und EF (Anreicherungsfaktor)
- EI (Ökotoxizitätsindex)
- ERI (Ökologischer Risikoindex)
- LRI (Langzeit-Risikoindex) → Umfassende ökologische Risikoanalyse.

### **4. Technologische und wirtschaftliche Bewertung**

- Technologien: Verbrennung, Pyrolyse, Biogas, Zementverwertung
- Wirtschaftliche Effizienz und Investitionsrendite
- Marktpotenzial für Schlammprodukte

### **5. Normen- und Politikreform**

- **MNS 5850:2019**
- **EU-Richtlinie 86/278/EWG, US EPA 503** → Identifikation von Lücken, Modernisierungsbedarf und Reformempfehlungen

#### **Bedeutung der Studie**

- Erste umfassende ökologische-geochemische Schlammstudie in der Mongolei
- Erste nationale Registrierung ökotoxikologischer Indikatoren (z. B. EC<sub>50</sub> = 4,2 %, EI = 7,7 %)
- Entwicklung eines nationalen Klassifikationssystems für Schlammrisiken (ERI-Modell)
- Erstellung von GIS-basierten Risikokarten
- Entwicklung technischer Lösungen und Kostenschätzungen zur Schlammverwertung

#### **Erwartete Ergebnisse**

- Nationale Basisdaten zur Schlammzusammensetzung und -sicherheit
- Integrierte ökologische Risikoanalyse
- Empfehlungen für technologische Großlösungen zur Schlammverwertung
- Vorschläge zur Normenaktualisierung und Verbesserung von Monitoringsystemen

#### **Übergeordnetes Ziel**

Entwicklung und Integration eines wissenschaftlich fundierten “Klärschlamm-Kreislaufwirtschaftsmodells“ in die nationale Politik, welches Klärschlamm in der Mongolei nicht als gefährlichen Abfall, sondern als erneuerbare Ressource anerkennt.

# I. ZUSAMMENFASSUNG

## 1.1. Begründung der Studie

Die Mongolei erzeugt jährlich durchschnittlich 150.000-180.000 Tonnen Klärschlamm, wobei dieses Volumen mit der zunehmenden Urbanisierung und industriellen Entwicklung weiter ansteigt. Klärschlamm weist einen dualen Charakter auf: Einerseits enthält er organische Substanz, Nährstoffe, Mikroorganismen und wertvolle Spurenelemente; andererseits ist er mit ökotoxischen Substanzen wie Schwermetallen, organischen Schadstoffen, Arzneimittelrückständen, Pathogenen, Mikroplastik und Flockungshilfsmitteln (PAM) belastet - und stellt somit ein ökologisch risikobehaftetes Abfallprodukt dar.

Die derzeitige Entsorgungspraxis - insbesondere Freilufttrocknung und Vergrabung im Boden - führt zu Grundwasser- und Bodenkontamination, Luftverschmutzung, Ausbreitung von Krankheitserregern und Methanemissionen. Dies stellt eine erhebliche Umweltbedrohung für Ulaanbaatar und die Provinzstädte dar.

Ziel dieser Studie ist eine wissenschaftlich fundierte Bewertung des mongolischen Klärschlamm, einschließlich seiner Wiederverwendungspotenziale und Umweltrisiken, unter Berücksichtigung internationaler Standards. Darauf aufbauend soll ein ökologisch sicheres und wirtschaftlich tragfähiges Managementmodell entwickelt werden.

## 1.2. Umfang und Methodik der Studie

### 1.2.1. Untersuchungsstandorte

Im Rahmen der Studie wurde eine umfassende Analyse von Klärschlamm aus mongolischen Abwassersystemen durchgeführt. Die Proben stammen aus 10 verschiedenen Quellen, klassifiziert nach Schlammtyp, industrieller Herkunft, chemisch-biologischer Belastung, technologischem Behandlungsgrad und Umweltrisiko.

#### Untersuchungsstandorte (10 Hauptquellen):

##### 1. Neue zentrale Kläranlage (Ulaanbaatar)

- Bezirk: Songinokhairkhan
- Technologie: Mechanisch + biologisch + Tiefenbelüftung + mechanische Entwässerung
- Kapazität: 250.000 m<sup>3</sup>/Tag
- Schlammmenge: ~55.000 m<sup>3</sup>/Jahr
- Besonderheit: Automatisiertes Management, hohe biologische Belastung (Pilotphase)

##### 2. Alte zentrale Kläranlage (Ulaanbaatar)

- Kapazität: 170.000 m<sup>3</sup>/Tag
- Schlammmenge: ~45.000 m<sup>3</sup>/Jahr
- Besonderheit: Überlastet, Geruchsbelastung, BSL-3-Risiko

##### 3. Khargia - Industriekläranlage für Gerbereiabwasser

- Kapazität: 12.000-15.000 m<sup>3</sup>/Tag
- Schlammmenge: ~20.000 m<sup>3</sup>/Jahr

- Besonderheit: Höchste chemische Belastung, inkl. Cr(VI)
- 4. Future Holding GMBH - Lederverarbeitung**
- Typ: Industrieller Schlamm
  - Merkmale: Hohes Chrom, Sulfide, organische Last
  - Anmerkung: Hauptverursacher für Khargia-Kläranlage
- 5. Städtische Kläranlage Darkhan**
- Kapazität: 36.000 m<sup>3</sup>/Tag
  - Schlammmenge: ~9.000 m<sup>3</sup>/Jahr
  - Besonderheit: Stabile hydraulische Belastung + biologische Behandlung
- 6. Städtische Kläranlage Choibalsan**
- Kapazität: 10.000-12.000 m<sup>3</sup>/Tag
  - Schlammmenge: ~3.000 m<sup>3</sup>/Jahr
  - Besonderheit: Winterbedingte Heizengpässe → hohe Pathogenbelastung
- 7. Biokombinat-Kläranlage (Ulaanbaatar)**
- Kapazität: 3.000-4.000 m<sup>3</sup>/Tag
  - Schlammmenge: ~1.500 m<sup>3</sup>/Jahr
  - Besonderheit: Niedriges Risiko, BSL-1
- 8. Kläranlage Moringiin Davaa**
- Kapazität: 7.000-8.000 m<sup>3</sup>/Tag
  - Schlammmenge: ~2.000 m<sup>3</sup>/Jahr
  - Besonderheit: Veraltete Technologie, hohe Sickerwasserbelastung
- 9. MCS Coca-Cola Industriekläranlage**
- Sektor: Lebensmittelindustrie
  - Kapazität: 2.500-3.000 m<sup>3</sup>/Tag
  - Schlammmenge: 800-1.200 m<sup>3</sup>/Jahr
  - Besonderheit: Fast keimfrei, BSL-1
- 10. Achir GMBH - Schlamm aus Kohlewäsche**
- Typ: Technischer Schlamm
  - Besonderheit: Niedrige Schwermetalle, hoher Chlorid- und TDS-Gehalt
- 11. Petro Matad GMBH - Bohrschlamm aus Erdölförderung**
- Typ: Ölbasierter Schlamm
  - Merkmale: Schwermetalle + Erdölrückstände, hochtoxisch

**Tabelle 1. Analytische Methoden**

Untersuchungsbereich	Eingesetzte Methoden und Normen
Chemische Analyse	ICP-MS (EPA 6020B), GC-MS (EPA 8270D), ISO 11885
Biologische Bewertung	ISO 11269-2 (Pflanzenwachstum), ISO 16072 (Bodenatmung)
Ökotoxikologische Tests	OECD 208 (terrestrische Pflanzen), OECD 202 ( <i>Daphnia magna</i> )
Risikobewertung	Igeo, EF, LRI, RI-Indizes; PCA-Korrelationsanalyse
Wirtschaftsanalyse	Techno-ökonomische Bewertung; Kosten-Nutzen-Verhältnis (CBA)

### 1.3. Zentrale Ergebnisse

Tabelle 2. Geochemische Analyseergebnisse

Element	Durchschnitt Schlamm (mg/kg)	MNS 5850:2019	EU 86/278/EWG	Bewertung
As	46	$\leq 25$	20-40	✗ Überschreitet Grenzwerte
Cr	183	$\leq 150$	100-150	✗ Überschreitet Grenzwerte
Pb	6	$\leq 100$	50-300	✓ Akzeptabel
Zn	153	$\leq 300$	150-1000	✓ Akzeptabel
Cu	41	$\leq 100$	50-175	✓ Akzeptabel
Cd	<1	$\leq 3$	1-3	✓ Akzeptabel

Arsen (As) und Chrom (Cr) überschreiten sowohl die nationalen (MNS) als auch die EU-Grenzwerte, was auf ein langfristiges Kontaminationsrisiko hinweist. Die übrigen Metalle liegen innerhalb der zulässigen Grenzen. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff (TOC 34-45 %) ist hoch, was den Schlamm für Energiegewinnung oder Kompostierung geeignet macht.

#### 1.3.1. Organische Schadstoffe

- **PAK:** 0,8-1,6 mg/kg
- **VOC:** 0,5-2,3 mg/kg
- **Flockungshilfsmittel (PAM):** 0,7-1,4 %
- **Arzneimittelrückstände:** Nachweis von  $\beta$ -Lactam- und Sulfonamid-Antibiotika

Verwendung von unbehandeltem Schlamm kann das mikrobielle Gleichgewicht im Boden stören und biotoxische Effekte verursachen.

### 1.4. Ökotoxikologische und biologische Bewertung

#### 1.4.1. Pflanzentoxizitätstest (*Helianthus annuus* L.)

- $EC_{50} = 4,2 \pm 0,7$  % (gemäß OECD 208)
- Wachstumssteigerung um 5-7 % bei 1 % Schlammanteil
- Konzentrationen über 5 % verursachten Phytotoxizität (Chlorose, Wurzelschäden)
- Akkumulation von As, Cr, Pb: 12-19  $\mu$ g/g Trockensubstanz
- Bioakkumulationsfaktor (BAF): 1,3-2,1
- Photosyntheseefizienz (Fv/Fm): Rückgang von 0,82  $\rightarrow$  0,68
- Chlorophyllabnahme (SPAD): 30-35 % Reduktion

**Fazit:** Eine Schlammzugabe von 1-3 % fördert die Nährstoffverfügbarkeit, während Konzentrationen über 5 % phytotoxisch wirken.

#### 1.4.2. Mikrobiologische Bewertung

- Nachweis von *E. coli*, *Clostridium perfringens*, *Aspergillus niger*
- Nach Kompostierung bei 55 °C über 7 Tage  $\rightarrow$  99,9 % Pathogenreduktion

#### 1.4.3. Ökotoxikologische Indikatoren

- Igeo (geochemischer Index): 0,53  $\rightarrow$  geringe bis mäßige Verschmutzung
- EF (Anreicherungsfaktor): 3,9  $\rightarrow$  geringe bis mittlere Anreicherung
- EI (Ökotoxizitätsindex): 7,7 %  $\rightarrow$  mittleres Risiko

- LRI (Auslaugungsrisikoindex): 2,9 → Hotspot-Zonen durch Cr und As

**Tabelle 3. Standortbezogene Risikoeinstufung**

Risikoklasse	Schlüsselstandorte	Merkmale
Hoch (LRI > 2,5)	Khargia, zentrale Kläranlage	Hohe As-Cr-Auslaugung, Grundwasserrisiko
Mittel (1,8-2,5)	Biokombinat, MCS	Erhöhte Cu-Zn-Werte & organische Schadstoffe
Niedrig (LRI < 1,8)	Darkhan, Matad, Achir	Natürlich stabile Umweltbedingungen

**Tabelle 4. Technologische und wirtschaftliche Bewertung**

Technologie	Investition (USD)	Output	CBA	Effizienz
Verbrennungsanlage (10 t/Tag)	1,5-3,0 Mio.	Energie, Asche	2,1	Strom- und Wärmeerzeugung
Biogasanlage	0,8-1,2 Mio.	CH <sub>4</sub> , Dünger	1,9	Amortisation in 3-5 Jahren
Pyrolyse	2-4 Mio.	Diesel, Öl	1,6	Eignet sich für öbelasteten Schlamm
Zementofen-Co-Processing	1,0 Mio.	Baumaterialien	1,7	Immobilisiert Schwermetalle (“Bindung“)

### Anmerkungen:

- Biogasnutzung und Zementverwertung **gelten als** am besten geeignet für mongolische Bedingungen
- Schlammverarbeitung reduziert das Volumen um bis zu 90 %
- CO<sub>2</sub>-Emissionen werden um 25-30 % gesenkt
- Das Modell “Schlamm als Ressource“ zeigt positive Wirtschaftlichkeit (CBA > 1,8)

**Tabelle 5. Bewertung: Regulierung, Normen und Politik**

Indikator	Mongolei	EU / International
Norm	MNS 5850:2019	EU 86/278/EWG, EPA 503
Überwachungssystem	Eingeschränkt	LIMS, QR-Tracking, digitale Berichte
Wiederverwendungspolitik	Passiv	Kreislaufwirtschaftsmodell
Exportbedingungen	Restriktiv	Bedingt erlaubt
Risikoklassifikation	2 Stufen	5-Stufen-System (A-E)

### Empfehlungen

1. Aktualisierung von MNS 5850:2019 gemäß EU-Richtlinie 86/278/EWG
2. Einrichtung von ISO/IEC 17025-akkreditierten Laboren
3. Umsetzung eines nationalen Programms “Schlamm-Kreislaufwirtschaft“ (2025-2030)
4. Förderung von Investitionen über PPP-Modelle
5. Einführung eines LIMS-Systems zur Rückverfolgbarkeit und digitalen Überwachung

### 1.5. Integrierte Schlussfolgerung

- Diese Studie stellt die erste umfassende öko-geochemische und ingenieurtechnische Bewertung von Klärschlamm in der Mongolei dar.
- Eine geeignete Behandlung kann die ökologischen Risiken um 70-80 % reduzieren und eine Einstufung in Klasse A (sicher) ermöglichen.
- Arsen (As) und Chrom (Cr) stellen ein langfristiges Auslaugungsrisiko dar und erfordern den Einsatz von Zement-Co-Processing, Verbrennung oder Ferrit-Stabilisierungstechnologien.

- Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Verwertung von Schlamm zu Energie, Düngemitteln oder Baumaterialien tragfähig (CBA 1,6-2,3).
- Die Studie bildet eine wissenschaftliche Grundlage für die nationale Politik “Schlamm als Ressource“, einschließlich Normenreform und Investitionsplanung.

### **Schlussfolgerung:**

Klärschlamm in der Mongolei sollte nicht als gefährlicher Abfall, sondern als erneuerbare Ressource und Schlüsselement einer Kreislaufwirtschaft betrachtet werden.

Diese Studie etabliert erstmals ein integriertes Bewertungsmodell, das chemische, biologische, ökotoxikologische, technische und wirtschaftliche Aspekte miteinander verbindet - als Grundlage für eine sichere und wirtschaftlich effiziente Schlammbehandlung in der Mongolei.

## II. EINLEITUNG

In den letzten zwei Jahrzehnten haben rasche Industrialisierung, Urbanisierung und Bevölkerungswachstum in der Mongolei zu einem signifikanten Anstieg der kommunalen und industriellen Abwassermengen geführt. Die bestehenden Kläranlagen - einschließlich technischer Infrastruktur, technologischer Ausstattung und Betriebssysteme - sind mit dieser Entwicklung nicht mehr Schritt gehalten. Systemausfälle und eine zunehmende Menge an Klärschlamm sind die Folge. Fehlende angemessene Behandlungsverfahren führen zu Umweltverschmutzung, Gesundheitsrisiken sowie zur Verschlechterung der Wasser-, Boden- und Luftqualität.

In Ulaanbaatar, wo rund 50 % der Bevölkerung lebt, fallen täglich 1.000-1.300 m<sup>3</sup> Klärschlamm an - allein in der zentralen Kläranlage (ZA) und ihren Nebenanlagen. Dieses Volumen übersteigt deutlich die bestehende Lager- und Behandlungskapazität und verschärft die ökologischen und hygienischen Belastungen im städtischen Raum.

In der derzeitigen Praxis werden sowohl Belebtschlamm als auch stabilisierter Schlamm auf offene Flächen transportiert, wo sie ohne jegliche spezielle Behandlung getrocknet und vergraben werden. Dies führt zu Bodenverunreinigungen, einer Verschlechterung der Grundwasserqualität, Geruchsbelastungen, der Anreicherung von Schwermetallen sowie zu einem erhöhten Risiko der Übertragung von Infektionskrankheiten.

Damit ist das Management von Klärschlamm aus der Abwasserbehandlung längst kein einfaches Entsorgungsproblem mehr, sondern zu einer multidimensionalen Herausforderung geworden, die direkt mit nachhaltiger Entwicklung, ressourceneffizienter Nutzung und urbaner Resilienz verknüpft ist. Der Übergang von der Betrachtung des Klärschlamm als „Abfall“ hin zur Anerkennung als strategische Ressource und seine Integration in ein auf der Kreislaufwirtschaft basierendes Managementsystem stellen den einzigen nachhaltigen und realistischen Weg in die Zukunft dar.

### **Internationale Erfahrungen zeigen:**

Weltweit haben zahlreiche Länder erfolgreich Konzepte zur Umwandlung von Klärschlamm in nutzbare Ressourcen umgesetzt, darunter:

- die Herstellung von biologischen Düngemitteln und Bodenverbesserern,
- die Produktion von Baumaterialien (Zement, Bausteine, Zuschlagstoffe),
- die Erzeugung von Energie (Biogas, Wärme, Strom),
- die Herstellung von Materialien für die Landrekultivierung.

Länder wie Deutschland, Südkorea, Japan sowie die Mitgliedstaaten der Europäischen Union haben diese Lösungen mit bemerkenswertem Erfolg eingeführt.

### **Herausforderungen in der Mongolei:**

Trotz des vorhandenen Umwelt- und Ressourcenschutzpotenzials bestehen folgende strukturelle Probleme:

- Begrenzte Fähigkeit zur Lokalisierung und Anwendung fortschrittlicher Technologien
- Unzureichende rechtliche und politische Rahmenbedingungen
- Fehlende Laborinfrastruktur und Qualitätssicherungssysteme

- Keine klaren Investitionsanreize oder Fördermechanismen

Nationale strategische Dokumente wie „Vision–2050“, die Politik für grüne Entwicklung, die Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs) sowie die national festgelegten Beiträge (NDC) unterstreichen die Notwendigkeit, die Ressourceneffizienz zu verbessern, abfallarme Produktionsweisen zu fördern und den Übergang zu einer grünen Wirtschaft zu vollziehen. Diese politischen Leitlinien heben die Bedeutung neuer Ansätze, einer besseren institutionellen Koordinierung sowie erhöhter Investitionen im Bereich des Klärschlammmanagements hervor.

Im Einklang mit diesen Zielen werden derzeit mehrere Projekte im Bereich Abwasser- und Klärschlammmanagement mit Unterstützung der Asiatischen Entwicklungsbank (ADB), der Japan International Cooperation Agency (JICA), der Millennium Challenge Corporation (MCC) sowie der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) umgesetzt. Eine einheitliche, systematische und langfristig nachhaltige Lösung ist jedoch bislang noch nicht vollständig etabliert.

Diese Studie wird im Rahmen einer am 25. Juni 2025 von der Deutsch-Mongolischen Wirtschaftsvereinigung ausgeschriebenen Ausschreibung mit dem Titel „Klärschlammrecycling und -wiederverwendung“ durchgeführt.

Die Hauptziele der Studie sind:

- die Ermittlung des tatsächlichen Volumens, der Struktur und der Zusammensetzung des in der Mongolei anfallenden Klärschlamm,
- die wissenschaftliche Bewertung von Klärschlammbehandlungsoptionen gemäß internationalen Standards,
- die Analyse technologischer Lösungen, der Investitionsrenditen sowie des regulatorischen Umfelds,
- die Identifizierung von Markteintrittsmöglichkeiten, Risiken und Zertifizierungsanforderungen für deutsche Technologieanbieter.

## 2.1. Aktueller Stand der Kläranlagen in der Mongolei

### 2.1.1. Struktur und Klassifizierung der Anlagen

Bis 2025 sind in der Mongolei rund 130 Abwasserbehandlungsanlagen (WWTPs) offiziell registriert. Davon sind mehr als 80 zentrale kommunale Kläranlagen, die häusliche und öffentliche Abwasserströme behandeln, während etwa 40 industrielle Vorbehandlungsanlagen sind.

- 80 zentrale kommunale Anlagen (Wohn- und öffentliches Abwasser)
- ~40 industrielle Vorbehandlungsanlagen (Bergbau, Lebensmittel, Leder, etc.)

Nahezu 60 % aller Kläranlagen wurden zwischen den 1960er und 1980er Jahren gebaut, und die meisten dieser Anlagen sind technologisch veraltet, haben ihre Auslegungslebensdauer überschritten und sind mit den heutigen Abwassereigenschaften und Belastungsniveaus nicht mehr kompatibel. Dadurch hat die Reinigungsleistung abgenommen, die Schlammmenge hat zugenommen und die Umweltrisiken nehmen weiter zu.

Aufgrund begrenzter technischer Kapazitäten, unzureichender Wartung, fehlender Finanzierung und personeller Engpässe lassen sich die Kläranlagen im ganzen Land wie folgt klassifizieren:

- **Voll funktionsfähig:** 51
- **Teilweise funktionsfähig:** 27
- **Nicht funktionsfähig:** 47

Staatliche Kläranlagen werden hauptsächlich von der staatlichen „Mongol Us“ AG, den Provinzgouverneursämtern sowie den zuständigen Regierungsbehörden betrieben. Industrielle Kläranlagen hingegen fungieren als Vorbehandlungseinheiten, die privaten Unternehmen angegliedert sind. In den letzten Jahren haben moderne Anlagen zur Abwasserrückgewinnung, die von Unternehmen wie MCS Coca-Cola und Gobi Cashmere errichtet wurden, erfolgreiche Modelle öffentlich-privater Partnerschaften (PPP) demonstriert.

### **2.1.2. Besonderheiten der Abwasserbehandlung in Ulaanbaatar**

In der Hauptstadt werden die Abwasserbehandlung und das Schlammanagement von der Wasser- und Abwasserbehörde Ulaanbaatar (Water Supply and Sewerage Authority, WSSA) durchgeführt. Insgesamt sind 266 Industriebetriebe und Unternehmen an das zentrale Netz angeschlossen, von denen mehr als 10 über eigene Vorbehandlungsanlagen verfügen.

Alte zentrale Abwasserbehandlungsanlage (CWTP)

- Errichtet zwischen 1964–1986
- Auslegungskapazität: 170.000 m<sup>3</sup>/Tag
- Tatsächliche Belastung: bis zu 210.000 m<sup>3</sup>/Tag
- Reinigungsleistung: 59–74 %
- Geplante vollständige Stilllegung im Oktober 2025

Neue zentrale Abwasserbehandlungsanlage

- Kapazität: 250.000 m<sup>3</sup>/Tag
- Ausgestattet mit vollständig automatisierter AAO-biochemischer Technologie (anaerob–anoxisch–oxisch)
- Inbetriebnahme im August 2025
- Herausforderung: Endbehandlung des Schlamms wurde in der Planungsphase nicht berücksichtigt → zukünftige Risiken wie Schlamakkumulation, Geruchsbelastung und Schwermetalle

Sekundäre und bezirkliche Kläranlagen

Anlagen wie Khargia (13.000 m<sup>3</sup>/Tag, Lederindustrie), Biocombinate, Nisekh und Dambadarjaa arbeiten mit veralteten Technologien, die dringend rehabilitiert werden müssen. Ihr Schlam wird mangels lokaler Behandlungsmöglichkeiten zur zentralen Anlage transportiert.

### **2.1.3. Aktueller Zustand des Schlammanagements**

Das Schlammanagement in der Mongolei folgt derzeit einer grundlegenden Struktur mit zwei Haupttypen von Klärschlamm:

1. Belebter Schlam (biologische Prozesse)
2. Stabiler Schlam (physikalisch, chemisch, biologisch behandelt)

Schlamm mengen:

- Ulaanbaatar: **1.100-1.300 m<sup>3</sup>/Tag, ≈ 840.000 m<sup>3</sup>/Jahr**
- Lederindustrie: **27.000-54.000 t/Jahr**, mit hohem Cr, Zn, Pb

Entsorgung und Lagerung

Der Schlamm wird von 67 lizenzierten Unternehmen transportiert und in nicht technisch gesicherten offenen Flächen abgeladen, wo er natürlich austrocknet. Diese Praxis führt zu:

- Bodenkontamination
- Grundwasserverschmutzung
- Emissionen von Methan (CH<sub>4</sub>) und Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S)
- Geruchsbelastung
- Anreicherung von Schwermetallen

Regulatorisches Umfeld

Ein einheitlicher Rechtsrahmen für das Schlammmanagement ist bislang nicht vollständig entwickelt. In einigen Provinzen wird unbehandelter Schlamm direkt in nahegelegene Flüsse oder in den Boden eingeleitet. Infolgedessen kommt es bei Flüssen wie dem Tuul, Orkhon und Kherlen zu Verschmutzung und ökologischem Rückgang.

## Fazit

1. Mongolische Klär- und Schlammbehandlungssysteme sind durch veraltete Technologien, fehlende Regulierung, unzureichende Finanzierung und begrenzte Betriebskapazitäten erheblich belastet.
2. Die Betrachtung von Klärschlamm als Ressource - für Biogas, Dünger, Baustoffe - ist zukunftsweisend, setzt jedoch Wissenschaft, Technologie-Transfer, Investitionsanreize und Qualitätskontrolle voraus.
3. Ohne eine Neuausrichtung des Systems gemäß Kreislaufwirtschaft drohen zunehmende Umweltzerstörung, gesundheitliche Risiken und ineffiziente Ressourcennutzung.

## 2.2. Abschätzung der Schlammanhäufung und Bewertung des Managements

### 2.2.1. Begründung

In den letzten Jahren hat die Mongolei einen raschen Anstieg der Menge an häuslichem und industriellem Abwasserschlamm verzeichnet, bedingt durch Bevölkerungswachstum, städtische Expansion und eine beschleunigte Industrialisierung. Darüber hinaus hat sich die Schlammmenge aus Bergbau-, Erdöl- und Lederverarbeitungsindustrien deutlich erhöht. Diese Schlammströme bergen aufgrund ihrer hohen Konzentrationen an Schwermetallen (Cr, Zn, Pb, Cu), organischen Schadstoffen, Krankheitserregern, Polyacrylamid (PAM) und Mikroplastik erhebliche ökologische und gesundheitliche Risiken.

Diese Situation hat zu mehreren dringenden Herausforderungen geführt:

- Starke Umweltbelastung und Ökosystemdegradation

- Gesundheitsrisiken für die Bevölkerung durch Übertragung von Krankheitserregern und Mikroschadstoffen
- Schwache politische, rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen
- Fehlende technologische Lösungen und unzureichende Investitionen

Daher zielt dieser Abschnitt darauf ab:

- die Quellen, Mengen und Eigenschaften von Schlamm in verschiedenen Sektoren zu identifizieren,
- die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Schlamms zu analysieren,
- die Schlammmangementpraktiken der Mongolei mit internationalen Standards zu vergleichen,
- zentrale Herausforderungen, Chancen und Investitionsbedarfe zu bewerten.

## 2.3. Struktur der Schlammerzeugung und -ansammlung in der Mongolei

**Tabelle 6. A. Klassifizierung der Schlammmquellen und durchschnittliche Jahresmengen (2025)**

Quelle	Durchschnitt pro Jahr (Tonnen)	Hauptstandorte	Wichtige Schadstoffe
<b>Kommunales und industrielles Abwasser</b>	70.800	Ulaanbaatar, Darkhan, Erdenet	Organische Substanz, Nitrat, Ammoniak, Krankheitserreger, PAM
<b>Bergbaurückstände &amp; Aufbereitungsschlamm</b>	5,8-8,5 Mio.	Umnugovi, Orkhon, Dornod	Schwermetalle (Cu, Zn, Pb), Cyanid, saure Abwässer
<b>Raffinerieschlamm</b>	1.100-2.700	Zuunbayan, Dornogovi	Kohlenwasserstoffe, ölige Rückstände
<b>Lederschlamm</b>	4.500-10.600	Ulaanbaatar (Khargia), Darkhan	Chrom (Cr VI), schwer abbaubare Organika, Nitrat, Gerüche

### Nationale Gesamtmengen (2025):

- Die Mongolei erzeugt jährlich 5,9-8,6 Millionen Tonnen Klärschlamm.
- Bis zu 98 % des Schlamms werden unbehandelt in die Umwelt eingeleitet.
- Die Wiederverwertungsquote liegt bei unter 1 % und ist damit äußerst niedrig.

## 2.4. Schlamakkumulation und Wachstumstrends in Ulaanbaatar

Aufgrund des Bevölkerungswachstums, der industriellen Expansion und der steigenden Infrastrukturbelastung zeigt die Schlammanhäufung in Ulaanbaatar zwischen 2020 und 2025 einen stetigen Aufwärtstrend.

**Tabelle 7. Schlammarten und Wachstumstrends**

Schlammtyp	2020 (t)	2025 (geschätzt, t)	Wachstum (%)	Hauptursachen
<b>Abwasserschlamm &amp; Asche</b>	32.400	36.000	+11,1 %	Bevölkerungswachstum, neue zentrale ARA
<b>Bergbauschlamm</b>	980.000	1,0-2,0 Mio.	+2-4 %	Ausbau der Kohleförderung
<b>Ölhaltiger Schlamm</b>	294	300-700	+2 %	Zunahme der Ölverarbeitungskapazität
<b>Lederschlamm</b>	1.980	2.000-5.300	+1-1,5 %	Wachstum der Leichtindustrie

## Gesamtmenge 2025:

- Ulaanbaatar erzeugt jährlich 1,0-2,0 Millionen Tonnen Schlamm.
- Trotz der Inbetriebnahme der neuen zentralen ARA sind die Schlammbehandlung, Geruchskontrolle und Wiederverwendungspraxis weiterhin sehr schwach.

### 2.4.1. Frühere Studien und aktuelles Management

**Tabelle 8. Übersicht früherer Studien**

Studentyp	Hauptinhalte / Ergebnisse	Einschränkungen
<b>Regierungsbeschluss Nr. 73 (2018)</b>	Pilotprojekte zur Kompostierung und Geruchskontrolle	Nicht nachhaltig umgesetzt; fehlende Infrastruktur und Markt
<b>Privatsektor (Eco Taikhi GMBH, Khovd Tul GMBH, Eco Energy System)</b>	Pilotanlagen und experimentelle Technologien	Nicht normkonform; keine Machbarkeitsstudien
<b>UNDP &amp; GIZ Studien</b>	Teilweise Bewertung ökologischer Risiken	Keine integrierte Datenbank; begrenzter Umfang

### 2.4.2. Einschränkungen, Chancen und internationale Trends

#### A. Einschränkungen und Lücken

1. Keine zentrale Datenbank zur Schlammzusammensetzung (chemisch, physikalisch, mikrobiologisch)
2. Begrenzte Laborkapazitäten; fehlende ISO/EN-akkreditierte Prüfeinrichtungen
3. Schwache techno-ökonomische Bewertungen; keine detaillierte Kosten-Nutzen-Analysen für Verwertungsoptionen (Biogas, Zement, Dünger)
4. Fragmentierte Regulierung; keine klare Klassifikation oder Wiederverwendungsrichtlinie
5. Hohe Kosten und strenge Anforderungen für moderne Technologien (Pyrolyse, Verbrennung, anaerobe Vergärung)

#### B. Chancen und globale Trends

1. Die weltweite Schlammerzeugung ist von 45 Millionen Tonnen (2017) auf 160 Millionen Tonnen (2023) gestiegen
2. Länder setzen zunehmend auf Ressourcengewinnung - Schlamm wird zu Dünger, Energie und Baustoffen verwertet
3. Technologien wie anaerobe Vergärung, Pyrolyse und thermische Behandlung ermöglichen Energiegewinnung und Zerstörung gefährlicher Substanzen
4. Die Integration von Schlammmanagement in die Kreislaufwirtschaft verringert die Umweltbelastung und fördert grüne Arbeitsplätze, Innovation und nachhaltiges Wachstum

#### Warum diese Studie von entscheidender Bedeutung ist:

- Weltweit wird Klärschlamm zunehmend nicht als Abfall, sondern als Ressource betrachtet.
- In der Mongolei führen Schlammakkumulation und Fehlmanagement zu erheblichen Umwelt- und Gesundheitsrisiken, während verlässliche Informationen, Technologien, Standards und Investitionsrahmen weiterhin unzureichend sind.

- Diese Studie bietet eine evidenzbasierte, international abgestimmte Grundlage, um Investitionen anzuziehen und fortschrittliche Technologien an lokale Bedingungen anzupassen.
- Durch koordinierte Zusammenarbeit zwischen Regierung, Privatsektor und Entwicklungspartnern kann die Mongolei Abwasserschlamm in eine wertvolle Ressource innerhalb eines modernen Kreislaufwirtschaftssystems umwandeln

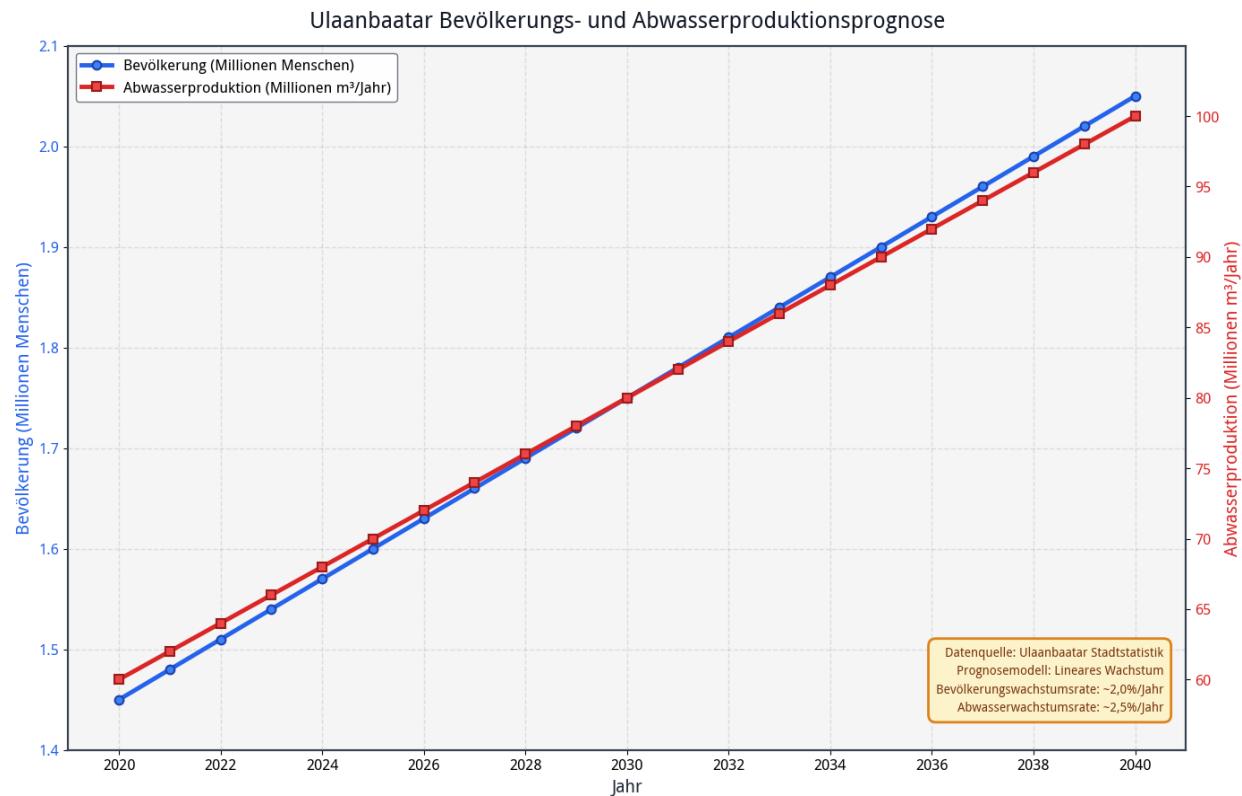
## **2.5. Demografie, Urbanisierung und Abwasserwachstum: Infrastrukturbedarf und Schlammaufkommen**

Die rasche Urbanisierung und die zunehmende Konzentration der Bevölkerung in städtischen Zentren der Mongolei haben einen erheblichen Druck auf die Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur ausgeübt. Dies hat zu deutlichen Kapazitätsengpässen bei den Kläranlagen Abwasserbehandlungsanlage sowie im nationalen Schlammmanagementsystem geführt. Insbesondere die übermäßige Bevölkerungsschichtung in Ulaanbaatar hat sowohl das Volumen als auch die Komplexität des Abwassers erhöht und erfordert höhere technologische Standards für neue Behandlungsanlagen. Dieser Trend beeinflusst unmittelbar die Behandlungseffizienz, die Schlammmenge und die langfristige Nachhaltigkeit der Schlammverarbeitungssysteme.

### **2.5.1. Bevölkerungswachstum und Zunahme der Abwassererzeugung**

- Urbanisierungsgrad: Im Jahr 2000 lebten 57 % der mongolischen Bevölkerung in städtischen Gebieten. Bis 2025 wird dieser Anteil voraussichtlich über 70 % steigen, was bedeutet, dass der Großteil der Bevölkerung an zentrale Wasser- und Abwassersysteme angeschlossen ist.
- Bevölkerung von Ulaanbaatar: Die Einwohnerzahl der Hauptstadt stieg von 1,46 Millionen im Jahr 2020 auf geschätzte 1,6 Millionen im Jahr 2025 (NSO, 2025). Dieses Wachstum führte proportional zu einer Zunahme der häuslichen Abwassermengen, die die Auslegungskapazität der Behandlungsanlagen überschreiten.
- Abwasseraufkommen: Die Abwassererzeugung erreichte im Jahr 2019 ein Volumen von 61,18 Millionen m<sup>3</sup> und wird bis 2025 voraussichtlich auf 68 Millionen m<sup>3</sup> ansteigen (UN Water, 2024).

Dieses Wachstum erhöht nicht nur den Druck auf das Abwasserbehandlungssystem, sondern steigert auch rasch das jährliche Schlammaufkommen, wodurch sich zukünftige Managementanforderungen sowie ökologische und wirtschaftliche Belastungen deutlich verstärken.



**Abbildung 1. Prognose des Bevölkerungs- und Abwasserwachstums in Ulaanbaatar**

### 2.5.2. Kapazität und Einschränkungen der technologischen Infrastruktur

Alte Zentrale Kläranlage (ZA): Diese Anlage wurde in den 1970er Jahren in Betrieb genommen und bis 2020 betrieben. Die Reinigungsleistung lag zwischen 59 % und 74 %. Die Verfahren zur Schlammeindickung, Filtration und Trocknung waren technologisch veraltet, energieintensiv und nur unzureichend automatisiert.

**Neue Zentrale Kläranlage (2022-2025):** Die Anlage wurde gemäß MNS 4943:2015 errichtet und ist mit einem vollautomatischen Bioreaktorsystem ausgestattet, das ein hohes Niveau der Primärbehandlung gewährleistet. Jedoch gilt Folgendes:

- Lösungen zur Umwandlung des Endschlamms in wirtschaftlich verwertbare Produkte wurden nicht vollständig in die Planungsphase integriert.
- Übergangslösungen beschränken sich weiterhin auf die hygienische Stabilisierung und Lagerung des Schlamms.

Dies stellt ein klares Beispiel für ein systemisches Versagen dar, bei dem “ein Problem gelöst wird, während gleichzeitig ein neues Risiko entsteht“.

### 2.5.3. Stadtplanung und zukünftige Belastungsrisiken

Im Rahmen des Generalentwicklungsplans von Ulaanbaatar bis 2030 ist vorgesehen, Haushalte aus Ger-Gebieten schrittweise an zentrale Wasser- und Abwassersysteme anzuschließen. Dies wird die Zahl der angeschlossenen Haushalte erhöhen und zu einem objektiven Anstieg des Zulaufs zur zentralen Kläranlage führen.

Der Anschluss der Ger-Gebiete an das zentrale Netz wird:

- neue Verbrauchsmuster mit höherem Wasserbedarf schaffen,
- die Schadstofffrachten im Abwasser erhöhen,
- die Zusammensetzung des Schlamms verändern und höhere Gehalte an organischer Substanz, Stickstoff und Nitrat verursachen.

Risiko:

Wenn Lösungen zur Wiederverwendung und Verwertung des Schlamms in der neuen zentralen Kläranlage nicht vollständig umgesetzt werden:

- Best-Case-Szenario: Der Schlammm wird lediglich eingedickt und gelagert.
- Worst-Case-Szenario: Die Schlamakkumulation führt zur Entstehung neuer ökologischer Kontaminations-Hotspots.

### “Grüne Entwicklung oder graue Krise?”

- Das rasche Bevölkerungswachstum, die Urbanisierung und die industrielle Expansion in der Mongolei zeigen, dass das Schlammmmanagement nicht durch isolierte Maßnahmen gelöst werden kann.
- Großinvestitionen - wie der Ausbau zentraler Infrastrukturen und die Inbetriebnahme der neuen Kläranlage - müssen mit einer umfassenden Schlammmstrategie verknüpft werden.
- Ohne Richtlinien zur Wiederverwendung von Schlammm und zur Rückgewinnung von Ressourcen:
  - Anstelle einer grünen Entwicklungsinfrastruktur
  - steht die Mongolei vor dem realen Risiko eines „Grauen-Krisen“-Szenarios mit zunehmender Umweltbelastung.

Daher muss jede Erweiterung oder Modernisierung der Abwasserinfrastruktur zwingend durch eine integrierte Strategie zur Schlammbehandlung und -wiederverwendung begleitet werden.

## 2.6. Forschungsziele und Untersuchungsrahmen

### 2.6.1. Allgemeines Ziel

Das Hauptziel dieser Studie besteht darin, den in der Mongolei anfallenden häuslichen und industriellen Klärschlamm quantitativ und qualitativ zu bewerten sowie umweltverträgliche, wirtschaftlich tragfähige und international abgestimmte technologische Lösungen für dessen Wiederverwendung zu identifizieren. Darüber hinaus sollen Marktchancen, Reformbedarfe im Politikbereich und Investitionsrichtungen analysiert und evidenzbasierte Empfehlungen für politische Entscheidungsträger, Unternehmen und internationale Partner formuliert werden.

### 2.6.2. Spezifische Ziele

1. Bestimmung von Herkunft, Zusammensetzung und Toxizität des Schlamms: Probenahme aus der zentralen Kläranlage von Ulaanbaatar sowie aus mehr als zehn sekundären Kläranlagen und aus Anlagen der Bergbau-, Leder- und Erdölverarbeitungsindustrie. Untersuchung chemischer (Schwermetalle, organische Schadstoffe), physikalischer (Feuchte, Dichte, pH-Wert) und biologischer (Pathogene, Mikroorganismen) Eigenschaften gemäß internationalen Standards.

2. Analyse internationaler Best Practices und Lokalisierungspotenziale: Untersuchung von Schlammrecyclingtechnologien und Managementsystemen in Deutschland, Japan, Südkorea und EU-Mitgliedstaaten; Identifikation geeigneter technischer und investiver Modelle für die Mongolei sowie der bestehenden Hemmnisse und Anforderungen.
3. Entwicklung von Basisdaten für techno-ökonomische Bewertungen: Durchführung von Versuchen und Kosten-Nutzen-Analysen für potenzielle Schlammprodukte (Biogas, Zementzusätze, Bausteine, organische Düngemittel, Pyrolyseprodukte) zur Unterstützung von Investitionsentscheidungen.
4. Bewertung ökologischer und sozialer Auswirkungen: Analyse der Auswirkungen der Schlammbehandlung auf Boden, Wasser, Luft und menschliche Gesundheit sowie Ableitung von Minderungsmaßnahmen und Monitoringkonzepten.
5. Bewertung der Laborkapazitäten und Entwicklung politischer Empfehlungen: Ermittlung der Anforderungen für den Aufbau von Laboren gemäß ISO-, ASTM- und EU-Standards sowie Ausarbeitung einer nationalen Laborentwicklungsstrategie.
6. Analyse des Marktumfelds und des rechtlichen Rahmens: Bewertung von Marktchancen, regulatorischen Bedingungen und Risiken für deutsche und andere internationale Technologieanbieter und Investoren.

### **2.6.3. Untersuchungsumfang**

Die Studie wurde in fünf Bereichen durchgeführt, die an nationale und internationale Standards angepasst sind:

1. Politik- und Regulierungsanalyse: Analyse der relevanten Gesetze, Verordnungen und Normen der Mongolei im Vergleich zu EU- und deutschen Regelwerken sowie Identifikation von Lücken, Hemmnissen und Chancen.
2. Geochemische und physikalische Analyse: Untersuchung von Schlammproben auf Schwermetalle, organische Schadstoffe, Feuchtegehalt, pH-Wert und Polyacrylamid (PAM) unter Anwendung von ISO 14001, ASTM D2974, EC 86/278/EWG und MNS 4943:2015.
3. Biologische Sicherheitsbewertung: Analyse der Ökotoxizität, Pathogenbelastung, mikrobiellen Umgebung und antibiotikaresistenter Bakterien.
4. Ingenieurtechnische und technologische Bewertung: Bewertung von Technologien zur Umwandlung von Schlamm in Zementmaterialien, Bausteine, Biogas und organische Düngemittel sowie Identifikation geeigneter und fortschrittlicher Technologien für die Mongolei.
5. Wirtschaftliche und marktbezogene Bewertung: Analyse von Nachfrage, Angebot, Kosten und wirtschaftlichen Erträgen des Schlammrecyclings sowie Entwicklung potenzieller Geschäftsmodelle und Investitionspfade.

### **2.6.4. Einhaltung von Standards**

Die Studie wurde in Übereinstimmung mit folgenden nationalen und internationalen Standards durchgeführt:

- ISO 14001 - Umweltmanagementsysteme

- ASTM D2974 - Standard zur Bestimmung von Feuchte- und organischem Gehalt
- EC 86/278/EWG - EU-Klärschlammrichtlinie
- MNS 4943:2015 - Technischer Standard für Klärschlamm aus
- Abwasserbehandlungsanlagen
- MNS 7003:2023 - Allgemeiner Standard für Abfallmanagement

Diese Standards ermöglichen einen Vergleich der Ergebnisse mit internationalen Referenzwerten und erleichterten den Technologietransfer.

### **2.6.5. Berichtszeitplan und Liefergegenstände**

Der Abschlussbericht einschließlich Analysen und Politikempfehlungen wird dem Auftraggeber und den relevanten Partnerinstitutionen am 1. September 2025 vorgelegt. Der Bericht dient als evidenzbasierte Referenz für die Deutsch-Mongolische Wirtschaftsvereinigung, staatliche Stellen und internationale Entwicklungspartner.

### **Zentrale erwartete Ergebnisse**

- Übereinstimmung von Forschungszielen, Methodik und Umfang mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft und des Übergangs zu grünen Technologien
- Erste umfassende Studie in der Mongolei, die geochemische, ingenieurtechnische, wirtschaftliche und politische Dimensionen des Schlammmanagements integriert
- Schaffung einer Grundlage für zukünftige Investitionen, Technologielokalisierung und regulatorische Reformen

### **2.7. Integrierte institutionelle Bewertung**

Das Management von Klärschlamm in der Mongolei erfordert ein koordiniertes Vorgehen zwischen Umweltschutz, technischer Infrastruktur, öffentlicher Gesundheit und wirtschaftlichen Sektoren. Derzeit führen jedoch institutionelle Überschneidungen, schwache Durchsetzung von Vorschriften, fragmentierte Informationssysteme und unzureichende Überwachungskapazitäten zu erheblichen Herausforderungen bei der Umsetzung einer einheitlichen und nachhaltigen Schlammmanagementpolitik.

Die Studie bewertete die Zuständigkeiten, Rollen und operativen Kapazitäten aller zentralen am Schlammmanagement beteiligten Institutionen und identifizierte wesentliche operative und koordinative Defizite.

## INSTITUTIONELLE STRUKTUR DES SCHLAMMMANAGEMENTS



**Abbildung 1. Institutionelle Struktur der an der Schlammwirtschaft beteiligten Akteure**

**Tabelle 9. Zentrale Institutionen im Schlammmanagement und ihre Rollen**

Institution	Mandat und Funktionen	Zentrale Rollen im Schlammmanagement	Herausforderungen
<b>Ministerium für Umwelt und Klimawandel (MFUUK)</b>	• Abfallwirtschaftspolitik und Regulierung	• Durchführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen und regulatorischer Überwachung bei Schlammverwertung und -behandlung	• Rechtliche Unklarheit bei der Einstufung von Schlamm als „Abfall“ oder „Ressource“
	• Einführung und Durchsetzung ökologischer Standards	• Überwachung gefährlicher Chemikalien und Schwermetalle	• Fehlen ökotoxikologischer Standards und Kriterien
	• Umweltbewertung, Genehmigung und Aufsicht	• Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen im Rahmen von Klimaverpflichtungen	• Begrenzte Laborkapazitäten
<b>Ministerium für Bauwesen, Stadtentwicklung und</b>	• Politik und Planung der technischen Infrastruktur	• Kapazitätsplanung und Bauaufsicht für zentrale und dezentrale Kläranlagen	• Nutzung von Schlamm nicht in Baustoffnormen berücksichtigt

<b>Wohnungsbau (MCUD)</b>	• Einführung von Bau- und technischen Normen	• Entwicklung und Genehmigung technischer Standards und Genehmigungen für den Einsatz von Schlamm in Baustoffen	• Unzureichende Konformitätsbewertung und Zertifizierungsmechanismen
	• Stadtplanung und Siedlungsmanagement		
<b>Ministerium für Gesundheit (MoH)</b>	• Schutz der öffentlichen Gesundheit	• Bewertung von Mikroorganismen, Viren, Bakterien und Pathogenen im Schlamm	• Mangel an Laboren für vollständige mikrobiologische Analysen
	• Überwachung von Pathogenen und Mikroorganismen	• Sicherstellung der Biosicherheit von Endprodukten aus Schlamm	• Biosicherheitsstandards nicht vollständig umgesetzt
<b>Wasser- und Abwasserversorgungsbehörde (WSUA) / Kommunale Versorgungsunternehmen</b>	• Trinkwasserversorgung und Abwassermanagement	• Sammlung, Lagerung und Erfassung von Schlamm aus zentralen und dezentralen Kläranlagen	• Kein Mandat für Endbehandlung oder Wiederverwendung von Schlamm
	• Betrieb von Kläranlagen und primäre Schlammbehandlung	• Durchführung von Eindickung, Siebung und Trocknung	• Unzureichende technologische Modernisierung und Investitionen
<b>Stadtrat / Büro des Provinzgouverneurs</b>	• Lokale Entwicklungspolitik, Budgetierung und Investitionen	• Bereitstellung von Flächen für Schlammbehandlungs- und Ressourcenrückgewinnungsanlagen	• Ineffiziente Zuweisung finanzieller Mittel
	• Genehmigung der Flächennutzung und Infrastrukturstandorte	• Integration von Schlammthemen in lokale Entwicklungsstrategien	• Fehlen langfristiger Schlammmanagementsysteme
<b>Privatsektor</b>	• Produktion, Investitionen und technologische Entwicklung	• Verarbeitung von Schlamm zu Zement, Blöcken, Biodünger und Bioenergie	• Unklarer regulatorischer Rahmen
	• Markteinführung und wirtschaftlicher Betrieb	• Pilotierung von Technologien und Lieferung von Ausrüstung	• Schwache Mechanismen zur Risikozertifizierung und -absicherung • Unterentwickelte öffentlich-private Partnerschaften (PPP)
<b>Internationale Organisationen (GIZ, JICA, EU, Weltbank, GTAI usw.)</b>	• Finanzierung, Pilotprojekte und politikberatende Unterstützung	• Umsetzung von Pilot- und Demonstrationsprojekten	• Projekte sind kurzfristig und weisen geringe Nachhaltigkeit auf
	• Stärkung von Labor- und institutionellen Kapazitäten	• Einführung internationaler Standards, Methoden und bewährter Verfahren • Durchführung von Risikobewertungen und Monitoring	• Unsicherheit im nationalen Rechtsrahmen behindert Lokalisierung und Skalierung

## 2.7.1. Systemische Defizite und Herausforderungen der institutionellen Koordination: Analytische Bewertung

Der rechtliche und institutionelle Rahmen für das Schlammmanagement in der Mongolei ist von Natur aus sektorübergreifend und erfordert eine Koordination zwischen mehreren Akteuren. Dennoch werden konsistent mehrere systemische Defizite festgestellt:

## **1. Fehlende zentrale politische Steuerung und Verantwortlichkeit**

- Es existiert keine einheitliche nationale Koordinierungsstelle.
- Die Verantwortung für die Endbehandlung und Wiederverwendung von Schlamm ist nicht klar definiert, wodurch ein “Verantwortungsvakuum“ entsteht.
- Institutionen wie MFUUK, MCUD, MoH und die Wasser- und Abwasserbehörde (WUA) agieren in fragmentierten politischen Zuständigkeitsbereichen ohne integrierte Budgetplanung oder gemeinsame Entscheidungsprozesse.

**Internationale Praxis (EU, Japan, Kanada):** Eine eigenständige “Biosolid Management Authority“ bündelt Politikgestaltung, Regulierung und strategische Planung.

## **2. Schwache Integration von Informationen und Daten**

- Jede Institution führt eigene Datenbanken und Methoden, was zu nicht kompatiblen Datensätzen führt.
- Es existiert keine einheitliche Datenbank zu Schlammqualität, chemischer Zusammensetzung, Pathogenen oder Schwermetallen; das Monitoring erfolgt unregelmäßig.
- Risikobewertungen und historische Datensätze sind unzureichend, was Prognosen und langfristige Planung beeinträchtigt.

### **Europäisches Beispiel:**

Zentrale Schlammmanagement-Datenbanken (SMD) integrieren Machbarkeitsstudien, Standards und Monitoring auf einer digitalen Plattform.

## **3. Unvollständiger rechtlicher und regulatorischer Rahmen**

- Es fehlt eine gesetzliche Definition zur Unterscheidung von Schlamm als “Abfall“ oder “Ressource“.
- Normen für Pyrolyse, Verbrennung, anaerobe Vergärung und andere fortschrittliche Behandlungstechnologien sind unzureichend entwickelt.

### **Japan:**

Im Rahmen des Gesetzes zur Förderung der Schlammwiederverwendung (1995) wird Schlamm offiziell als Ressource klassifiziert, mit detaillierten mehrstufigen Standards für alle Verwertungsphasen.

## **4. Begrenzte Labor- und technische Kapazitäten**

- Nur wenige akkreditierte Labore sind in der Lage, umfassende Analysen gemäß ISO-, ASTM- und EC-Standards durchzuführen.
- Unzureichende Gegenprüfungen, unabhängige Audits und internationale Akkreditierungen.

### **Deutschland:**

Ohne akkreditierte Laborergebnisse sind Technologielizenzen, Teilnahme an Ausschreibungen oder Projektgenehmigungen nicht zulässig.

## **5. Schwache Unterstützungsmechanismen für die Beteiligung des Privatsektors**

- Marktvertrauen und Zertifizierung von Schlammprodukten sind unzureichend.
- Öffentlich-private Partnerschaften (PPP) sind unterentwickelt, mit geringer Unterstützung für Forschung und Innovation.
- Regulatorische Instabilität und fehlende akkreditierte Laborergebnisse erhöhen das Investitionsrisiko.

### **Deutschland und Südkorea:**

Grüne Beschaffungsmechanismen priorisieren umweltfreundliche Produkte im öffentlichen Einkauf.

#### **2.7.2. Notwendigkeit institutioneller Reformen**

Die Mongolei benötigt eine umfassende Reform ihrer institutionellen Koordination, Verantwortlichkeitsstrukturen, Informationssysteme, rechtlichen Rahmenbedingungen und technischen Kapazitäten für ein nachhaltiges Schlammmanagement.

Die folgenden strategischen Maßnahmen werden empfohlen:

##### **1. Einrichtung einer nationalen Koordinierungsstruktur** Schaffung eines Schlammmanagement-Koordinationskomitees mit Beteiligung mehrerer Ministerien und Akteure zur Zentralisierung von Politik, Standards und Aufsicht.

##### **2. Entwicklung eines einheitlichen Informationssystems und einer GIS-Datenbank** Einführung einer Schlamm-GIS- und Datenbankplattform mit folgenden Inhalten:

- Qualitätsindikatoren
- Mengen und Standorte
- Verarbeitungsstatus
- ökotoxikologische Risiken
- Umwelt- und Gesundheitsrisikoprofile

##### **3. Umsetzung rechtlicher Reformen** Einführung spezifischer Gesetze und untergeordneter Normen zur klaren Einstufung von Schlamm als Ressource, einschließlich:

- Wiederverwendungswegen
- Produktzertifizierung
- Sicherheitsanforderungen
- End-of-Waste-Kriterien

##### **4. Stärkung der Laborkapazitäten**

- Aufbau akkreditierter Labore gemäß ISO/EN-Standards
- Einführung standardisierter Methoden und externer Auditmechanismen
- Sicherstellung der Datenzuverlässigkeit für Projektgenehmigungen und Investitionen

##### **5. Förderung der Beteiligung des Privatsektors**

- Anwendung grüner Beschaffung im öffentlichen Einkauf
- Unterstützung von Schlammprodukten (Zementzusätze, Biodünger, Energieprodukte)
- Ermöglichung des Marktzugangs durch Zertifizierung, Risikoteilungsmodelle und PPP-Rahmen

## Schlussfolgerung

Diese institutionelle Analyse bestätigt, dass das Schlammanagement in der Mongolei derzeit fragmentiert, unzureichend reguliert und schlecht koordiniert ist. Durch die Stärkung der politischen Integration, der Laborkapazitäten, der Datensysteme, der regulatorischen Grundlagen und der Beteiligung des Privatsektors kann die Mongolei den Übergang zu einem nachhaltigen, kreislauforientierten und wirtschaftlich tragfähigen “grünen Schlammanagementsystem“ vollziehen.

### 2.8. SWOT-Analyse der Akteure und politische Matrix

In der Mongolei ist das Management von Klärschlamm ein komplexes Politikfeld, das die Beteiligung staatlicher Institutionen, des Privatsektors, internationaler Organisationen, lokaler Verwaltungen und der Zivilgesellschaft erfordert. Daher wurde eine umfassende SWOT-Analyse durchgeführt, um die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken jeder Akteursgruppe zu bewerten. Diese Analyse dient als Grundlage für die Entwicklung einer strategischen politischen Matrix.

#### 2.8.1. SWOT-Analyse der Stakeholder

**Tabelle 10. SWOT-Analyse der wichtigsten Stakeholder**

Stakeholder	Stärken	Schwächen	Chancen	Risiken
<b>Staatliche Institutionen (MFUUK, MCUD, MoH, Wasserver- und Abwasserbehörde (WUA), lokale Verwaltungen)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Verfügen über nationale politische und regulatorische Zuständigkeiten</li> <li>•Etablierte Abwasserinfrastruktur, Planungs- und Aufsichtssysteme</li> <li>•Fähigkeit zur Umsetzung nationaler Normen, Vorschriften und Genehmigungssysteme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Schwache sektorübergreifende Koordination</li> <li>•Instabile Haushalts- und Finanzierungsstrukturen</li> <li>•Begrenzte technische und labortechnische Kapazitäten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Möglichkeit der Anbindung an internationale Klima- und Green-Development-Programme</li> <li>•Grundlage für die Umsetzung von Zielen und Programmen der Kreislaufwirtschaft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Politische Diskontinuität</li> <li>•Schwache Durchsetzung und geringe Umsetzungsleistung</li> <li>•Risiko des Wegfalls finanzieller Unterstützung</li> </ul>
<b>Privater Sektor (Industrie, Investoren, Technologieanbieter)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Marktorientiert, flexibel und innovationsgetrieben</li> <li>•Fähigkeit zur Einführung neuer Technologien und Geschäftsmodelle</li> <li>•Hohe betriebliche Effizienz und Managementkompetenz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Schwacher rechtlicher Rahmen und fehlende Zertifizierungssysteme</li> <li>•Hohes Investitionsrisiko</li> <li>•Unzureichende Labor- und standardbasierte Nachweise</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Einführung neuer PPP-Modelle möglich</li> <li>•Wirtschaftliche Chancen durch Umwandlung von Schlamm in Produkte (Zementzusätze, Düngemittel, Bioenergie)</li> <li>•Gewinnung ausländischer Investitionen und Technologietransfer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Risiko des Produktversagens aufgrund unklarer Standards und instabiler Marktbedingungen</li> <li>•Steuer- und Lizenzinstabilität als Investitionshemmnis</li> <li>•Geringes Verbrauchertrauen und potenzieller gesellschaftlicher Widerstand</li> </ul>
<b>Internationale Organisationen /</b>	<b>•Finanzielle Unterstützung,</b>	<b>•Lokale Gesetze, Normen,</b>	<b>•Möglichkeit zur Einführung</b>	<b>•Abhängigkeit von Gebern;</b>

Geber (EU, GIZ, JICA, Weltbank, GTAI usw.)	technisches Know-how und Laborkapazitäten • Einführung internationaler Standards und bewährter Verfahren • Ausrichtung an Klimaschutz- und Emissionsminderungszielen	Infrastruktur und personelle Kapazitäten begrenzen die Technologieanpassung • Kurze Projektlaufzeiten; langfristige Nachhaltigkeit nicht immer gewährleistet	einheitlicher Standards nach Vorbild der EU-Klärschlammrichtlinie • Mobilisierung von Finanzmitteln zur Reduzierung von Boden- und Wasserverschmutzung sowie CO <sub>2</sub> -Emissionen • Zugang zu Green Funds und Klimainvestitionsmechanismen	Projekte enden mit Auslaufen der Finanzierung • Fehlanpassung an nationale Politiken mindert Wirksamkeit • Falsche Technologieanpassung kann Umweltbelastungen verursachen
--	--	---	---	--

Diese SWOT-Analyse unterstützt eine koordinierte Zusammenarbeit zwischen staatlichen Institutionen, Privatwirtschaft und internationalen Partnern und bildet die Grundlage für politische Kooperation und technologischen Wandel.

## 2.8.2. Politische Matrix: Ziele, Maßnahmen, Zuständigkeiten

Auf Grundlage der SWOT-Analyse konzentriert sich die folgende politische Matrix auf fünf Säulen: rechtlicher Rahmen, institutionelle Koordination, wirtschaftliche Anreize, technologische Innovation und gesellschaftliche Einbindung.

**Tabelle 11. Politische Matrix**

Politisches Ziel	Vorgeschlagene Maßnahmen / Aktivitäten	Zuständige Institutionen / Stakeholder	Zeitrahmen
1. Schaffung eines rechtlichen Rahmens zur Einstufung von Schlamm als Ressource	• Einführung der Kategorie „Wertstoff / Biosolid / Ressource“ im Abfallgesetz • Entwicklung von Standards und End-of-Waste-Kriterien für schlamm basierte Produkte (Düngemittel, Zementzusätze, Biogas) • Aktualisierung von MNS- und ISO-Normen; Aufbau von Laborakkreditierungsmechanismen	MFUUK, MCUD, NSO, MASM, Justizministerium	2026-2028
2. Institutionelle Koordination und integriertes Informationssystem	• Einrichtung eines „Nationalen Schlammmanagements“ • Entwicklung eines einheitlichen „Schlammmanagement-Informationszentrums“ (GIS + Datenbank) • Genehmigung von Daten- und Berichtsverfahren	MFUUK, WUA, Bürgervertretung (Stadtrat), Provinzgouverneure, NSO, IKT-Behörde, internationale Partner	2026-2028
3. Förderung privater Investitionen und Entwicklung von PPP-Modellen	• Einführung grüner Kredite, Steueranreize und finanzieller Fördermechanismen • Entwicklung standardisierter PPP-Vertragsmodelle • Einführung eines „Resource-Recovery-Geschäftsmodells“	Finanzministerium, Wirtschaftsministerium, MFUUK, Geschäftsbanken, Privatsektor	2026-2029
4. Lokalisierung von Technologien, Innovation und Pilotprojekten	• Umsetzung von Pilotprojekten zu Verbrennung, Pyrolyse und Biogas mit internationalen Partnern (GIZ, EU, GTAI) • Durchführung von Pilotversuchen und Machbarkeitsstudien • Einführung von Monitoring- und Compliance-Systemen	MFUUK, Privatsektor, WUA, internationale Partner	2026-2030
5. Stärkung öffentlicher	• Durchführung öffentlicher Informationskampagnen zu Nutzen und	MFUUK, MoH, Stadtrat, NGOs, Medien	2026-2028

Kontrolle, Vertrauen und Bewusstsein	Sicherheit schlamm basierter Produkte • Aufbau von Zertifizierungs- und Konformitätsbewertungssystemen • Einbindung von Zivilgesellschaft und Medien in das Monitoring		
--------------------------------------	--	--	--

## INTERNATIONALE ERFAHRUNGEN UND MONGOLISCHER KONTEXT

### Internationale Best Practices

- Europäische Union (EU):** Die Klärschlammrichtlinie 86/278/EWG bildet einen umfassenden rechtlichen Rahmen für Wiederverwendung, Qualitätskontrolle und Umweltschutz.
- Japan:** Nach dem Gesetz zur Förderung der Schlammwiederverwendung (1995) wird Schlamm offiziell als Ressource klassifiziert; Verbrennung, Biogas und Düngemittel werden über strukturierte PPP-Modelle umgesetzt.
- Deutschland und Republik Korea:** Durch grüne Beschaffungsmechanismen werden schlamm basierte Produkte systematisch in die öffentliche Beschaffung integriert.
- Kanada und skandinavische Länder:** Ein “One-Governance-Body“-Modell bündelt Schlammmanagement unter einer nationalen Behörde.

### Zentrale Defizite in der Mongolei

- Fehlende rechtliche Klassifizierung von Schlamm als Ressource
- Schwache Laborakkreditierung und unzureichende Qualitätssicherung
- Fehlende Finanzierungsmechanismen und unterentwickelte PPP-Strukturen
- Keine integrierten Monitoring- und Informationssysteme
- Geringes öffentliches Vertrauen und begrenztes Bewusstsein

**Schlussfolgerung:** Die Mongolei muss einen integrierten, multisectoralen und systembasierten Ansatz für das Schlammmanagement verfolgen.

**Recht + Technologie + Labor + Markt + Bildung = Nachhaltiges Schlammmanagement-Ökosystem**

Dieses integrierte Modell kann innerhalb der nächsten 5-10 Jahre messbare Ergebnisse liefern.

### 2.9. Informationslücken und Chancen für Pilotmodelle

Der Mongolei fehlen derzeit grundlegende Daten, Laboranalysen, technologische Bewertungen und Marktinformationen, die für den Aufbau eines umfassenden Schlammmanagementsystems erforderlich sind. Diese Informationslücken beeinträchtigen evidenzbasierte Politikgestaltung, die Entwicklung von Pilotprojekten, Investitionsentscheidungen und PPP-Kooperationen.

#### 2.9.1. Informationslücken und ihre Auswirkungen

**Tabelle 12. Informationslücken und deren Auswirkungen**

Feld / Bereich	Aktuelle Lücken / Defizite	Auswirkungen auf Systeme, Management und Technologie
<b>Geochemische Zusammensetzung &amp; Eigenschaften</b>	Kein landesweites System für regelmäßige, akkreditierte Tests auf Schwermetalle (Cr, Pb, As), organische Schadstoffe (PAM, PAH, Mikroschadstoffe), Feuchtigkeit, Feststoffe, pH, EC usw.	Technologiewahl (Dünger, Bausteine, Bioenergie, Verbrennung) wird unzuverlässig; falsche Technologieentscheidungen können zu Umwelt- und wirtschaftlichen Schäden führen.
<b>Mikrobiologische Sicherheit &amp;</b>	Keine umfassenden Tests auf Krankheitserreger, Viren, Bakterien,	Sicherheit und Machbarkeit für landwirtschaftliche oder bodenbezogene

<b>Biosicherheit</b>	Parasiten oder Wirksamkeit der Stabilisierung nach ISO-, WHO- und EU-Standards	Anwendungen können nicht bestimmt werden; Produktzertifizierung ist unmöglich.
<b>Ingenieur- &amp; Technologieparameter</b>	Unzureichende Forschung zu Trocknung, Verbrennung, Pyrolyse, anaerober Vergärung (Abbaurate organischer Stoffe, Heizwert, Aschegehalt, Energieertrag)	Keine solide Grundlage für die Auswahl der sichersten und effizientesten Technologien für die Bedingungen der Mongolei; unvollständige Kosten-Nutzen- und Risikoanalysen.
<b>Markt- &amp; Wirtschaftsdaten</b>	Begrenzte Forschung zu Marktnachfrage, Verbrauchertrauen, Preisgestaltung, Lieferketten und Zertifizierung für schlamm basierte Produkte (Zementzusätze, Bausteine, Dünger, Biogas)	Investitionsbewertung wird erschwert; Engagement des Privatsektors, Geschäftsmodelle und Exportmöglichkeiten bleiben unklar.
<b>Standards, Zertifizierung &amp; Rechtskonformität</b>	Keine etablierten MNS-Standards für Schlammprodukte; keine ISO/EN/EC-Konformitätsmatrix oder Überwachungssystem	Eingeschränkter Zugang zu in- und ausländischen Märkten; Technologielokalisierung und ausländische Investitionen werden verlangsamt.

Diese Lücken behindern evidenzbasierte Entscheidungen in den Bereichen Technologie, Wirtschaft, öffentliche Gesundheit, Markt und Politik und schwächen die Grundlage für die Entwicklung von Pilotprojekten.

### 2.9.2. Pilotmodelle und Umsetzungsmöglichkeiten

Auf Grundlage der Studie werden die folgenden Pilotmodelle als für die Mongolei geeignet betrachtet, unter Berücksichtigung internationaler Best Practices sowie technischer und wirtschaftlicher Machbarkeit.

**Tabelle 13. Pilotmodelle**

Pilotmodell	Zweck	Erforderliche Vorbereitung, Ressourcen	Wesentliche Überlegungen & Risiken
<b>Zentrales Laborzentrum</b>	Aufbau eines Systems für routinemäßige chemische, physikalische und biologische Tests (Pathogene, Mikroben, organische Stoffe, Schwermetalle, Feuchtigkeit, pH, EC).	<ul style="list-style-type: none"> <li>ISO/EN/ASTM-konforme Ausstattung und Personal</li> <li>Probenlagerung- und Datenmanagementsysteme</li> <li>Finanzierung durch Geber, Projekte oder Regierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Personalfloktuation</li> <li>Unterbrechungen der Finanzierung</li> <li>Schwache QA/QC bei Proben mindert die Glaubwürdigkeit</li> </ul>
<b>Baustoff-Pilotanlage</b>	Testproduktion von Zement, Blöcken und Ziegeln unter Verwendung von Schlamm-Asche-Gemischen; Bewertung von Qualität und Sicherheit.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Technische Versuche mit Asche-Gemischen</li> <li>Anpassung von Standards</li> <li>Marktanalysen und Akzeptanztests</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Schwermetalle oder organische Rückstände können die Produktqualität beeinträchtigen</li> <li>Markteintritt erschwert, wenn das öffentliche Vertrauen gering ist</li> </ul>
<b>Biogas- und Energiesystem</b>	Produktion von Methan, Wärme und Strom; Reduzierung der Schlammmasse.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versuche zu anaerober Vergärung, Pyrolyse und thermischer Behandlung</li> <li>Finanzierung, Ausstattung, Umweltüberwachung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Schwankende Schlammzusammensetzung beeinflusst die Leistungsfähigkeit</li> <li>Risiko schädlicher Emissionen bei unzureichender Kontrolle</li> </ul>
<b>Boden- und</b>	Verwendung von sanitisiertem,	<ul style="list-style-type: none"> <li>Chemische und</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Risiko der Boden- oder</li> </ul>

<b>Agrarversuche</b>	zertifiziertem Schlamm als Dünger oder Bodenverbesserer.	<ul style="list-style-type: none"> <li>mikrobiologische Tests</li> <li>• Aufsicht, Genehmigungen, Zertifizierung</li> <li>• Lokale Zusammenarbeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wasserkontamination durch Schwermetalle oder Mikroschadstoffe</li> <li>• Akzeptanz in der Gemeinschaft ist entscheidend</li> </ul>
----------------------	--	--	---

Pilotprojekte bilden die Grundlage für:

- Technologielokalisierung
- Laborakkreditierung
- Entwicklung von Geschäftsmodellen
- zukünftige Strategien zur Umwandlung von Schlamm in Ressourcen

**Tabelle 14. Empfehlungen und erforderliche Maßnahmen**

Nr.	Ziel	Aktionen / Maßnahmen	Erwartete Vorteile / Auswirkungen	Verantwortliche Akteure
1	Aufbau eines einheitlichen Datensystems	Erstellung eines Online-Data-Clearinghouse, das Schlammzusammensetzung, -quellen, Testergebnisse, Verarbeitungsmethoden und Produktanwendungen integriert und mit Geodaten verknüpft.	Verbesserte Transparenz; evidenzbasierte Entscheidungsfindung; erhöhtes Vertrauen von Investoren.	MECC, NSO, MASM, GIZ, GTAI
2	Grundlagen für PPP-Zusammenarbeit schaffen	Entwicklung standardisierter PPP-Verträge, Definition von Rahmenwerken für Gewinnbeteiligung und Risikomanagement.	Investitionen anziehen; Vertrauen aufbauen; Risiken reduzieren.	Finanzministerium, MECC, NSO, Privatsektor
3	Verbesserung der Kosteneffizienz von Machbarkeitsstudien	Einsatz von Multi-Szenario-Simulationen (LCA, Kosten-Nutzen, Kosten-Risiko) zum Vergleich technologischer Optionen.	Optimale Technologiewahl mit klarer Risiko-/Nutzenanalyse.	GTAI, GIZ, JICA, NSO, Ingenieurberater
4	Identifizierung der Best Available Technologies (BAT)	Bewertung von anaerober Vergärung, Pyrolyse, Zementwerk-Ko-Verarbeitung, Kompostierung und anderen anhand von Kosten, Sicherheit, Produktqualität und Klimaauswirkungen.	Evidenzbasierte Technologieentscheidungen.	MECC, MASM, Technologieanbieter
5	Öffentliches Engagement und Vertrauen stärken	Durchführung von Aufklärungskampagnen; Entwicklung von Rückverfolgbarkeitssystemen für Schlammprodukte.	Aufbau von Verbrauchervertrauen und Marktakzeptanz.	MoH, MECC, lokale Regierungen, Privatsektor, NGOs

### Abschließende Zusammenfassung

Für einen sicheren Übergang zu einem Sludge-to-Resource-Modell sind notwendig: Aufbau eines wissenschaftlichen Datensystems, Pilotprojekte, akkreditierte Labore, moderne Technologien, starke PPP-Mechanismen sowie öffentliches Vertrauen. Durch eine schrittweise Umsetzung kann die Mongolei Schlamm von „Abfall“ zu „Ressource“ transformieren und eine klima- und kreislauforientierte Entwicklung fördern.

### III. POLITISCHE UND RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

#### 3.1. Struktur und Kohärenz des nationalen Rechtsrahmens

In der Mongolei wird das Klärschlammmanagement indirekt und fragmentiert durch mehrere Sektorengesetze geregelt, darunter Umwelt-, Wasser-, Abfall-, Stadtentwicklungs-, Gesundheits- und Agrargesetze. Ein einheitlicher politischer Ansatz, ein integrierter Rechtsrahmen oder ein zentrales Aufsichtssystem existieren jedoch nicht. Diese Lücke schränkt die Fähigkeit der Mongolei ein, Schlamm in sozioökonomischen Mehrwert umzuwandeln, Umweltsicherheit zu gewährleisten, Innovation zu fördern und Investitionen anzuziehen.

##### 3.1.1. Kohärenz und Schwächen nationaler Politikdokumente

Die mittel- und langfristigen Entwicklungsstrategien der Mongolei sowie sektorübergreifende Politiken sind nur indirekt mit dem Schlammmanagement verknüpft. Das Fehlen spezifischer Indikatoren, institutioneller Mechanismen und koordinierter Umsetzung schwächt die Wirksamkeit dieser Politiken erheblich.

**Tabelle 15. Politische Dokumente und ihre Relevanz für das Schlammmanagement**

Politisches Dokument	Relevanz für das Schlammmanagement	Stärken / Chancen	Schwächen / Lücken
Vision-2050	Beinhaltet unter der Säule der grünen bzw. kreislauforientierten Wirtschaft das Ziel, “Abfälle in Ressourcen umzuwandeln“.	Schafft eine Grundlage für ökologische Innovation und grüne Investitionen.	Klärschlamm wird nicht explizit erwähnt; es fehlen Indikatoren und konkrete Umsetzungsmechanismen.
SDGs-2030	Die Ziele 6.3, 6.6, 12.4 und 12.5 stehen in direktem Zusammenhang mit dem Schlammmanagement (Wasserqualität, Verringerung von Verschmutzung, Abfallreduktion und -wiederverwendung).	Hohes Potenzial zur Gewinnung internationaler Entwicklungspartner (EU, JICA, UNDP) und Projektfinanzierungen.	Schwache nationale Umsetzung; fehlende nationale Monitoringindikatoren; keine nationale Datenbank oder Statistik zur Schlammverwertung.
Green Development Policy (2014)	Ziele zur Umwandlung von Abfall in Ressourcen könnten theoretisch Schlamm einschließen, werden jedoch nicht explizit benannt.	Legt eine Grundlage für die Kreislaufwirtschaft; enthält Regelungen zur Förderung ökologischer Innovationen.	Abfallkategorien sind allgemein gehalten; Schlamm ist nicht als eigene Kategorie definiert; es fehlen grüne fiskalische Instrumente (Steueranreize, Subventionen).
Regierungsbeschluss Nr. 73 (2018) “Schlammrecycling der Zentralen Kläranlage“	Ermöglichte Pilotversuche zur Kompostierung und Düngemittelherstellung - erste konkrete staatliche Maßnahme im Schlammsektor.	Erhöhte Sichtbarkeit; Verbesserung der Laborkapazitäten; Einleitung von Pilotpraktiken.	Zeitlich begrenzte Maßnahme; keine langfristige Strategie; fehlende Standards, Zertifizierung, Risikokriterien und Monitoring-Systeme.

## Synthese der Ergebnisse

- Auf nationaler Ebene besteht ein politisches Bekenntnis zum Ansatz "Abfall-zu-Ressource", jedoch ohne eine spezifische Politik für das Schlammmmanagement.
- Institutionelle Zuständigkeiten (MFUUK, MCUD, MoH, WUA, lokale Verwaltungen) sind fragmentiert und durch schwachen Datenaustausch gekennzeichnet.
- Die Verknüpfung von Politik, Gesetzgebung und Normen ist unzureichend, was zu schwacher Umsetzung führt.

### 3.1.2. Interinstitutionelle Politikkonflikte und Koordinationsprobleme

Das Schlammmmanagement bewegt sich zwischen zwei Politikbereichen:

1. **Umweltsicherheit und Ressourcenmanagement**  
Zuständig: MFUUK, Wasserbehörde, Gesundheitsministerium
2. **Technische Infrastruktur und Wiederverwendung**  
Zuständig: MCUD, WUA (Wasser- und Abwasserversorgung)

Zwischen diesen Bereichen besteht jedoch keine rechtliche und operative Abstimmung, was zu Überschneidungen von Zuständigkeiten und fragmentierter Finanzierung führt. Beispiele hierfür sind:

- Das MFUUK klassifiziert Schlammm als Abfall, während das MCUD ihn als ingenieurtechnisches Material betrachtet.
- Das Wassergesetz definiert Schlammm als "Behandlungsrückstand", enthält jedoch keine Regelungen zur Wiederverwendung.
- Das Gesundheitsministerium ist für Hygiene und Biosicherheit zuständig, jedoch existieren in der Mongolei keine international anerkannten Klassifizierungen von Biosoliden (Klasse A/B).

#### Folgen

- Inkonsistente Daten und doppelte Inspektionen
- Ineffiziente Entscheidungsprozesse
- Beteiligung von 4-6 verschiedenen Behörden bei Genehmigungsverfahren
- Verzögerungen bei Investitionsgenehmigungen aufgrund rechtlicher Unklarheiten

Dies verdeutlicht einen systemischen Mangel an rechtlicher Kohärenz in der Schlammgovernance.

### 3.1.3. Politische Schlussfolgerungen und Entwicklungsrichtungen

#### Zentrale Schlussfolgerungen

1. In der Mongolei existiert kein spezifisches Gesetz zum Schlammmmanagement; entsprechende Regelungen sind auf Wasser-, Abfall-, Umwelt- und Infrastrukturgesetze verteilt.
2. Politische Dokumente propagieren eine ressourcenbasierte Wirtschaft, jedoch ohne entsprechende rechtliche Umsetzung.
3. Der wirtschaftliche Status von Schlammm ist ungeklärt - gefährlicher Abfall oder wertvolle Ressource -, diese Frage bleibt gesetzlich unbeantwortet.

## Empfohlene Entwicklungspfade

- Ausarbeitung eines eigenständigen Gesetzes, beispielsweise eines “Gesetzes über das Management von Klärschlamm“, das Technologien, Standards, Monitoring und wirtschaftliche Nutzung in einem kohärenten Rahmen integriert.
- Abstimmung von Politik, Gesetzgebung und Finanzierung über Umwelt-, Stadtentwicklungs-, Sanitär- und Energieprogramme hinweg.
- Klare Festlegung institutioneller Zuständigkeiten nach dem Prinzip einer “Single Point of Responsibility“.

## Zusätzliche Erkenntnis

“In der Mongolei wird Klärschlamm weiterhin primär im Rahmen der Abfallwirtschaft betrachtet, was den Übergang zu einem ressourcenbasierten rechtlichen und wirtschaftlichen Modell verlangsamt. Die Anerkennung von Schlamm als Ressource anstelle einer Belastung würde neue Wege für nachhaltige Entwicklung, Innovation und Kreislaufwirtschaft eröffnen.“

## 3.2. Analyse internationaler rechtlicher Referenzrahmen und Normenkonformität

### 3.2.1. Allgemeine Bewertung und Geltungsbereich

Der nationale Standard MNS 7003:2023 - “Anforderungen an die Wiederverwendung von häuslichem Abwasserschlamm“ ist das erste technische Dokument in der Mongolei, das systematisch Anforderungen an die Schlammverwertung definiert. Im Vergleich zu den Regelwerken der EU, der USA, von ISO und UNEP bestehen jedoch erhebliche Defizite hinsichtlich Umfang, Tiefe und Durchsetzungsmechanismen:

1. Begrenzter Anwendungsbereich mit Fokus auf Schwermetalle; breitere chemische Indikatoren fehlen.
2. Unzureichende Anforderungen an biologische Sicherheit, Desinfektion und Pathogeneliminierung.
3. Neue Schadstoffe (PFAS, PAH, Phthalate, Arzneimittellückstände) sind nicht berücksichtigt.
4. Anforderungen an QA/QC und akkreditierte Labore sind unklar.
5. Internationale Konformität (CE/EPA) und Exportzertifizierung sind nicht abgestimmt.

### 3.2.2. Vergleichende regulatorische Bewertung

Tabelle 16. Vergleichende normative Bewertung

Kriterium	MNS 7003:2023	EU-Richtlinie 86/278/EEC (EU-Schlammrichtlinie)	US EPA 40 CFR Part 503 (Biosolids Rule)	ISO 19698:2018 / UNEP 2019 Leitfaden
<b>Schwermetalle (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, As, Hg)</b>	Strenge Grenzwerte (Pb, Cu, Zn), aber Überschreitungen bei As und Cr wahrscheinlich	Grenzwerte je nach Landnutzung (Landwirtschaft, Rekultivierung)	Klasse A/B differenzierte Grenzwerte	Harmonisiert und ausgerichtet
<b>Organische Schadstoffe (PFAS, PAH, Phthalate, Arzneimittel)</b>	Nicht enthalten	Enthalten gemäß EN 16174	Unter Bewertungskriterien abgedeckt	In UNEP 2019 enthalten
<b>Pathogen- &amp; mikrobiologische Kontrolle</b>	Teilweise (nur E. coli, Salmonella)	Desinfektion obligatorisch	Klasse A: alle Pathogene eliminiert	ARG, MRB, vollständiges biologisches Risiko

<b>Labor-QA/QC</b>	Nicht vorgeschrieben	Jährliche Berichterstattung erforderlich	ISO/IEC 17025 verpflichtend	ISO/IEC 17025 wesentlich
<b>Ökotoxikologie (LC<sub>50</sub>, EC<sub>50</sub>, chronische Toxizität)</b>	Nicht enthalten	Bodenökotoxizitätsschwellen enthalten	Moderat kontrolliert	Obligatorisch
<b>Grüne Wirtschaft / Produktstatus</b>	Als „Abfall“ klassifiziert	Als „biologische Ressource“ klassifiziert	Als „Biosolid-Produkt“ anerkannt	„Ressourcenbasierte Ansatz“
<b>Exportkonformität</b>	Eingeschränkt	CE-Konformität	EPA-Genehmigung und Zertifizierung	ISO-Konformität

### 3.2.3. Vergleichende Analyse internationaler Regulierungsansätze

#### 1. Europäische Union -Richtlinie 86/278/EWG („Klärschlammrichtlinie“)

**Zweck:** Sicherstellung der umwelt- und gesundheitsschutzgerechten Nutzung von Klärschlamm in der Landwirtschaft sowie Schutz der Bodenökosysteme.

##### Wesentliche Merkmale:

- Grenzwerte für Schwermetalle abhängig von Bodentyp und Ausbringungszyklus (alle 3-5 Jahre)
- Verbot der Ausbringung von nicht desinfiziertem Klärschlamm
- Verpflichtende Laborüberwachung und jährliche Berichterstattung in eine nationale Datenbank
- CE-Kennzeichnung für Produkte, die auf den EU-Markt gelangen

**Vergleich mit der Mongolei:** Obwohl MNS 7003:2023 strenge Grenzwerte festlegt, fehlen ein systematisches Monitoring sowie CE-konforme Zertifizierungsmechanismen.

#### 2. USA - US EPA 40 CFR Part 503 („Biosolids Rule“)

**Zweck:** Neudeinition von behandeltem Klärschlamm als wiederverwertbares Biosolid-Produkt.

- **Klasse A:** Vollständige Inaktivierung aller Pathogene; Einsatz für Lebensmittelkulturen zulässig
- **Klasse B:** Einschränkte Nutzung (Rekultivierung, Landschaftsbau)
- Jährliche Zertifizierung durch die EPA erforderlich
- Laboranalysen müssen gemäß ISO/IEC 17025 durchgeführt werden

**Vergleich mit der Mongolei:** Die Klassifizierung in **Klasse A/B**, akkreditierte Überwachung sowie Zertifizierungssysteme fehlen in MNS 7003:2023.

#### 3. ISO 19698:2018 -“Schlamm - Biologische Behandlung“

Fokus auf Qualitätskontrolle biologischer Behandlungstechnologien (anaerobe und aerobe Vergärung, Kompostierung).

Beinhaltet:

- Mikrobiologische, chemische und ökotoxikologische Indikatoren
- Anforderungen an thermische Stabilisierung
- Analysen von Mikroschadstoffen
- Verpflichtende Akkreditierung der Labore nach ISO/IEC 17025

**Mongolei:** Akkreditierte Labore und ISO-Protokolle sind in MNS 7003:2023 nicht verankert.

#### 4. UNEP 2019 & WHO-Leitlinien -Sicherer Einsatz von Abwasser und Klärschlamm in der Landwirtschaft

Moderner “Waste-to-Resource“-Ansatz auf Basis von Risikomanagement.

Beinhaltet:

- Neue Schadstoffe (PFAS, Pharmazeutika)
- Mikroplastik
- Antibiotikaresistenz-Gene (ARG)

**Mongolei:** Keiner dieser neu auftretenden Risikofaktoren ist in MNS 7003:2023 berücksichtigt.

#### 3.2.4. Bewertung der ökotoxikologischen und laborbezogenen Konformität

Tabelle 17. Analyse der Laborkonformität

Kriterium	MNS 7003:2023	Internationale Standards (EU / ISO / US)	Bewertung
<b>Laborakkreditierung</b>	Nicht spezifiziert	ISO/IEC 17025 verpflichtend	Wenige akkreditierte Labore; schwache QA/QC
<b>Probenahmemethodik</b>	MNS 5667:2006 (veraltet)	ISO 5667, EN 16174	Nationale Methodik technisch überholt
<b>Prüfparameter</b>	6-8 Schwermetalle, Basis-Mikrobiologie	20+ Indikatoren (Metalle, Organika, Pathogene, ARG, PFAS)	Organische Schadstoffe fehlen
<b>Ökotoxikologische Tests</b>	Nicht gefordert	Pflicht (LC <sub>50</sub> , EC <sub>50</sub> , NOEC)	Fehlende Umweltverträglichkeitsbewertung
<b>Monitoringfrequenz</b>	Nicht definiert	Alle 6-12 Monate	Kein systematisches Monitoring

#### Zusammenfassung

MNS 7003:2023 erfüllt nur die Grundanforderungen auf nationaler Ebene, liegt jedoch deutlich unter internationalen Standards.

Chemische, mikrobiologische und ökotoxikologische Parameter sind unzureichend abgedeckt.

Der Mangel an akkreditierten Laboren schwächt die Zuverlässigkeit der Ergebnisse.

#### 3.2.5. Auswirkungen auf Rechtsangleichung und Politik

##### Rechtsangleichung

MNS 7003:2023 ähnelt EU- und US-Rahmenwerken konzeptionell, jedoch fehlen verbindliche Rechtsdefinitionen wie:

- Biosolid
- Ressourcenmaterial
- Bioabfall

Diese Begriffe existieren im mongolischen Recht nicht.

##### Wirtschaftliche Auswirkungen

Produkte, die den Anforderungen der MNS 7003:2023 entsprechen, können keine CE- oder EPA-Zertifizierung erhalten, was Export- und ausländische Investitionsmöglichkeiten einschränkt. Projekte im Bereich grüner Innovation und Privatinvestitionen (z. B. EU Green Transition, SWITCH-Asia) könnten dadurch nicht förderfähig sein.

## Gesundheits- und Umweltrisiken

- Potenzielle As- und Cr-Überschreitungen → Bodenakkumulation → Lebensmittelrisikos
- Fehlende Klasse-A-Desinfektion → Pathogenreaktivierung möglich
- Keine ökotoxikologische Kontrolle → unbekannte Ökosystemwirkungen

### 3.2.6. Politikempfehlungen

**Tabelle 18. Politikempfehlungen**

Ebene	Erforderliche Maßnahmen	Erwartete Ergebnisse
Standardsbehörde (MASM)	Aktualisierung von MNS 7003:2023 nach ISO 19698:2018, EN 16174, US EPA 503	Umfassendes chemisches & mikrobiologisches Monitoring
MECC, MCUD	Nationales Programm zur Schlammqualitätsüberwachung entwickeln	Regelmäßiges Monitoring & zentrale Datenbank
Labor-Netzwerk	ISO/IEC 17025 Akkreditierung; QA/QC-Protokolle	International anerkannte, zuverlässige Analytik
Regierung	Einführung eines “Biosolid-Produktzertifizierungssystems“ (CE, ISO Ecolabel)	Exportfähigkeit & Investitionsanreiz
Internationale Partnerschaften	Nutzung von EU-, GIZ-, JICA-Technikassistenz	Stärkere Kapazitäten und Pilotprojekte

### 3.2.7. Integrierte Bewertung - Zusammenfassung

Obwohl MNS 7003:2023 ein bedeutender erster Schritt ist, bleibt der Standard weit hinter internationalen Anforderungen zurück. Hauptdefizite im Vergleich zu EU-USA-ISO:

- Begrenzter Umfang (keine organischen Schadstoffe, Pathogene, PFAS)
- Schwache QA/QC und fehlende Laborakkreditierung
- Unzureichende gesundheitliche und ökologische Kriterien
- Keine Exportkompatibilität
- Keine rechtliche Anerkennung als “Ressource“

Die Aktualisierung der MNS 7003:2023 auf internationale Standards ist entscheidend, damit die Mongolei die Wiederverwendung von Schlamm, die Entwicklung einer grünen Wirtschaft, Exportbereitschaft und Investitionsattraktivität vorantreiben kann.

## 3.3. Rechtliche Klassifizierung und Regulierungsrahmen für Abwasser- und Klärschlammmanagement

### 3.3.1. Bewertung des aktuellen rechtlichen Umfelds

Die Mongolei verfügt derzeit über **keine rechtliche Grundlage**, die Klärschlamm nach chemischer Zusammensetzung, Gesundheitsrisiken oder ökologischen Auswirkungen klassifiziert.

- Das **Abfallwirtschaftsgesetz** führt Klärschlamm nicht ausdrücklich in der Kategorie der gefährlichen Abfälle auf.
- Das **Wassergesetz** definiert Klärschlamm lediglich als “Reststoff aus dem Reinigungsprozess“, ohne Bestimmungen zur Wiederverwendung oder Umwandlung in verwertbare Produkte.

- Das **Gesetz über die städtische Wasserversorgung und Abwasserentsorgung** enthält keine Regelungen zur Behandlung, Lagerung, zum Transport oder zur Produktentwicklung aus Klärschlamm.

**Folgen:**

- Keine rechtliche Sicherheit für Bewertung, Wiederverwendung oder Export von Schlamm-basierten Produkten
- Überschneidungen der institutionellen Zuständigkeiten und unregulierte Verwaltungslücken
- Schwache Kontrolle von Umwelt- und Gesundheitsrisiken
- Eingeschränkte Möglichkeiten für ausländische Investitionen, Technologietransfer und Lizenzierung

### 3.3.2. Internationale Klassifizierungsansätze für das Schlammanagement

Internationale Rechtsrahmen (EU, USA, ISO, WHO) bewerten Abwasserschlamm anhand eines dualen Ansatzes: Risikokategorie + vorgesehene Nutzung.

Diese duale Struktur gewährleistet sowohl chemische und biologische Sicherheit als auch die Förderung wirtschaftlicher Wiederverwendungsoptionen.

**Tabelle 19. Vergleich internationaler Klassifikationssysteme**

Region / System	Klassifikationsstruktur	Schlüsselindikatoren	Hauptanwendungsbereiche
<b>EU Richtlinie 86/278/EWG</b>	“Behandelter“ vs. “Unbehandelter“ Schlamm	Schwermetalle, Desinfektion, Bodenanalytik	Landwirtschaft, Renaturierung
<b>US EPA Part 503</b>	Class A / Class B	Pathogene, Schwermetalle, organische Schadstoffe	Lebensmittelkulturen, Landschaftsbau
<b>ISO 19698:2018</b>	Biologisch behandelt / Thermisch behandelt / Kompost	Desinfektionseffizienz, EC <sub>50</sub> , Toxizitätsschwellen	Phytosanierung, Energie, Baustoffe
<b>WHO 2018 / UNEP 2019</b>	Risikobasierte Stufen (niedrig, mittel, hoch)	Pathogene, ARG, Mikroplastik	Landwirtschaft, Energie, eingeschränkte Nutzung

### 3.3.3. Vorgeschlagenes mongolei-spezifisches Klassifikationssystem (S0-S3 + Integration von Class A/B)

Ein nationales Klassifikations- und Managementsystem (S0-S3) wird vorgeschlagen, das auf mongolische Bedingungen zugeschnitten ist und internationale Best Practices integriert. Das System verbindet chemische Eigenschaften, mikrobiologische Belastungen, Risikostufen und vorgesehene Nutzung in einem einheitlichen rechtlich-technischen Modell.

**Tabelle 20. Vorgeschlagenes nationales Klassifikationssystem**

Klasse	Eigenschaften	Nutzung / Anwendung	Managementansatz	Internationale Entsprechung
S0 -Reiner Schlamm	Sehr niedrige Schwermetalle & Pathogene; EC <sub>50</sub> > 10%; Mikroschadstoffe < Nachweisgrenze	Düngemittel, Bodenverbesserer, Begrünung	Direkte Nutzung; leichte Prüfpflicht; Kennzeichnung	EU “Processed Sludge“ / US Class A
S1 -	Geringe chemische	Kompostierung,	Kontrollierte	US Class A

Hygienisierter Schlamm	Belastung; desinfiziert; EC <sub>50</sub> = 5-10%; geringe ARG	Rekultivierung, Grünflächen	Kompostierung ≥55°C, ≥7 Tage	(eingeschränkt) / ISO bio-behandelt
S2 -Chemisch belasteter Schlamm	Hohe Cr-, As-, Ni-, Pb-Werte; EC <sub>50</sub> = 3-5%; nachweisbare Mikroschadstoffe	Energiegewinnung, Zementindustrie, Baustoffproduktion	Pyrolyse, thermische Behandlung, Verhüttung	EU nicht-landwirtschaftlicher Schlamm / ISO thermisch behandelt
S3 - Gefährlicher Schlamm	Hohe Gehalte an Pharmazeutika, PFAS, PAH, ARG, Pathogenen; EC <sub>50</sub> < 3%	endlagerung, gesicherte Deponie	Spezialisierte Behandlung, kontrollierter Transport	WHO Hochrisiko-Biosolid

### Wesentliche Merkmale:

- **S0-S1:** Rohstoffe für die Kreislaufwirtschaft (Düngemittel, Bodenverbesserer, Phytosanierung)
- **S2:** Geeignet für Energie- und Industrieprozesse (Pyrolyse, Zementöfen, thermische Behandlung)
- **S3:** Als gefährlicher Abfall einzustufen; kontrollierte und sichere Entsorgung erforderlich

#### 3.3.4. Hierarchie des Schlammanagements

Auf Basis internationaler Praxis wird eine **vierstufige Schlammanagement-Pyramide** für die Mongolei vorgeschlagen.

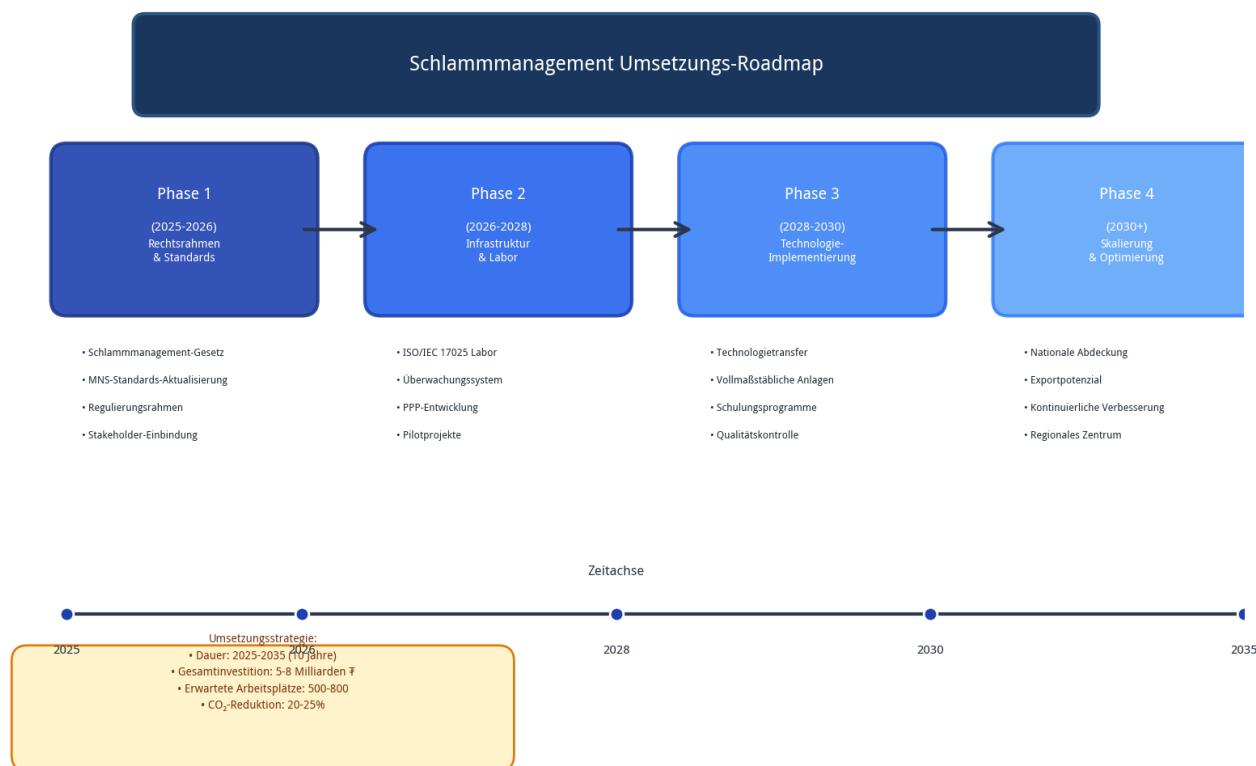


Abbildung 2. Schlammanagement Umsetzungs-Roadmap

## VORGESCHLAGENE RECHTLICHE REFORMEN

**Tabelle 21. Vorgeschlagene rechtliche Reformen**

Gesetz / Standard	Reformrichtung	Erwarteter Zweck und Ergebnis
Abfallwirtschaftsgesetz	Aufnahme von Schlamm in die Kategorien “Bioabfall“ / “Wertstoffabfall“ / “Bio-Ressource“	Schaffung einer klaren rechtlichen Abgrenzung zwischen Abfall und Ressource
Standard MNS 7003:2023	Integration der Klassifizierung S0-S3 sowie der hygienischen Kriterien Klasse A/B als Anhänge	Einführung eines gestuften chemischen, biologischen und hygienischen Kontrollrahmens
Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung	Ergänzung schlammbezogener Bewertungskriterien (LCA, EC <sub>50</sub> , ARG usw.)	Sicherstellung einer risikobasierten und evidenzgestützten Technologieauswahl
Neues Gesetz: “Gesetz über das Management von Abwasserschlamm“	Einheitliche Regulierung von Technologien, Standards, Laboren, Kreislaufwirtschaft, Export und Compliance	Schaffung der rechtlichen Grundlage für eine “Schlamm-zu-Ressource-Ökonomie“

## RISIKO- UND WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG

**Tabelle 22. Risiko- und wirtschaftliche Bewertung**

Kategorie (S0-S3)	Umweltrisiko	Wirtschaftlicher Wert	Regulatorischer Ansatz
S0	Sehr gering (sicher)	Hoch (Düngemittel, Bodenprodukte)	Offene Nutzung
S1	Begrenzt	Mittel (Kompost, Rekultivierung)	Kontrollierte Nutzung
S2	Mittel-hoch (chemisch)	Mittel (Energie, Baustoffe)	Sondergenehmigung
S3	Sehr hoch	Gering (kostenintensive Entsorgung)	Verbotene oder isolierte Behandlung

### Schlussfolgerung:

Dieses Modell balanciert Risiko-Nutzen-Abwägungen, klärt staatliche Regulierungsfunktionen, definiert Anforderungen an die Laboraufsicht und bestimmt den angemessenen Umfang der Beteiligung des Privatsektors.

### 3.4. Schwächen, Chancen und politische Empfehlungen für das rechtliche Umfeld

Dieser Abschnitt wendet internationale Methoden der Politikbewertung (SWOT + GAP + Policy Roadmap) an, um die mongolische Gesetzgebung zum Schlammanagement, die institutionelle Kohärenz, regulatorische Lücken und Reformprioritäten zu analysieren - in Übereinstimmung mit den Analyseformaten von GIZ, UNEP.

#### 3.4.1. Aktuelles rechtliches Umfeld und institutionelle Struktur

Das Management von Abwasserschlamm in der Mongolei ist auf fünf zentrale Gesetze verteilt, ohne ein integriertes Regulierungssystem.

**Tabelle 23. Politische Dokumente**

<b>Gesetz / Politikdokument</b>	<b>Relevanz für das Schlammmanagement</b>	<b>Aktueller Regulierungsstatus</b>
Gesetz über den Umweltschutz	Umweltaufsicht, Umweltverträglichkeitsprüfung	Schlamm wird ausschließlich als "Abfall" behandelt - keine Ressourcenperspektive
Abfallwirtschaftsgesetz	Gefährliche und kommunale Abfälle	Keine explizite Klassifizierung von Schlamm
Wassergesetz	Kontrolle der Wasserverschmutzung, Abwasserbehandlung	Definiert Schlamm als "Behandlungsrückstand", ohne Wiederverwendungsrahmen
Gesetz über städtische Wasserver- und Abwassersysteme	Betrieb von Kläranlagen und Schlamm	Keine Regelungen zur Wiederverwendung oder Produktentwicklung
Gesetz über die öffentliche Gesundheit	Prävention von Infektionen, Hygiene	Schwache Kriterien zur Pathogenkontrolle und Biosicherheit

**Gesamtbewertung:**

Der gesetzliche Rahmen konzentriert sich auf Abfallbeseitigung und nicht auf Ressourcengewinnung. Dies hemmt Innovation, Investitionen, Technologieeinführung und die Entwicklung grüner Produkte.

**3.4.2. SWOT-Analyse des rechtlichen Umfelds****Tabelle 24. SWOT-Analyse**

<b>Faktoren</b>	<b>Stärken</b>	<b>Schwächen</b>
Internes Umfeld	Politische Grundlagen im Einklang mit "Vision 2050" und den Zielen der Grünen Entwicklung	Schwache Abstimmung zwischen Gesetzen, Politiken und Normen; fehlende Umsetzungsleitlinien
	Verabschiedung von MNS 7003:2023 als erster Schritt zur Standardisierung von Schlamm	Unzureichende Laborakkreditierung und fehlendes nationales Monitoringsystem
	Etablierte Organisationsstrukturen der Wasserbehörden (WUA, MFUUK u. a.)	Keine Klassifizierung für Pathogene oder Biosicherheit (Klasse A/B) Unklarer rechtlicher Status schlamm basierter Produkte (häufig als Abfall behandelt) Schwache regulatorische Pfade für Konformitätsbewertung, Produktzertifizierung und Marktakzeptanz

**Schlussfolgerung:**

Obwohl politische Institutionen vorhanden sind, bleiben Risikosteuerung, Verantwortlichkeit und Durchsetzungsmechanismen schwach. Ohne Aktualisierung von Gesetzen und Standards wird Schlamm weiterhin als Abfall statt als Ressource behandelt.

**3.4.3. GAP-Analyse des rechtlichen Umfelds****Tabelle 25. GAP-Analyse**

<b>Kriterium</b>	<b>Aktuelle Situation (Mongolei)</b>	<b>Internationale Anforderungen (EU / USA / ISO)</b>	<b>Lücke</b>
<b>Rechtliche Definition</b>	Schlamm = Abfall	Schlamm = Ressource	Unklarer

			Rechtsstatus
<b>Hygiene &amp; Pathogenkontrolle</b>	Teilweise	Klasse A/B klar definiert	Unzureichende Kontrolle
<b>Laborakkreditierung</b>	ISO 17025 nicht erforderlich	ISO/IEC 17025 verpflichtend	Keine Akkreditierung
<b>Mikroschadstoffe, PFAS, ARG</b>	Nicht enthalten	Verpflichtendes Monitoring	Fehlende chemische Kontrolle
<b>Monitoring &amp; Berichterstattung</b>	Unregelmäßig	Jährliche Audits + Online-Berichte	Geringe Transparenz
<b>Rechtliche Grundlage für Wiederverwendung</b>	Temporäre Versuche	Rechtlich garantiert	Keine dauerhafte Rechtsbasis

**Gesamtbewertung:** Das Schlammanagement der Mongolei liegt etwa 50-60 % unter internationalen Konformitätsstandards. Eine Kette von Problemen besteht fort: politische Fehlanpassung → schwaches Monitoring → fehlende akkreditierte Labore → keine internationale Konformität.

### 3.4.4. Defizite der institutionellen Koordination

**Tabelle 26. Institutionelle Koordination**

Ebene	Zuständige Institution	Aktuelle Rolle	Vorgeschlagene neue Rolle / Struktur
<b>Politische Ebene</b>	MFUUK	Umweltregulierung	Führende nationale Schlammanagementpolitik
<b>Normen &amp; Qualität</b>	MASM	Einführung von MNS 7003	Aktualisierung der Normen gemäß ISO/EN; Aufsicht über Akkreditierung
<b>Technisch &amp; operativ</b>	WUA, MCUD	Schlammoperationen in Kläranlagen	Umsetzung eines ingenieurtechnischen “Sludge-to-Resource“-Programms
<b>Inspektion &amp; Audit</b>	Gesundheits- und Fachinspektionen	Hygienekontrollen	Einführung biologischer Audits Klasse A/B
<b>Forschung &amp; Analyse</b>	Universitäten, Labore	Grundlagenforschung	Einrichtung eines offiziellen Datenzentrums (Sludge Data Clearinghouse)

### 3.4.5. Politischer Reformfahrplan

#### Phase 1 (2025-2026): Grundlegende rechtliche Reformen

- Ausarbeitung und Verabschiedung des Gesetzes über das Management von Abwasserschlamm
- Angleichung von MNS 7003:2023 an ISO 19698:2018 und EU-Richtlinie 86/278/EWG
- Legalisierung der biologischen Sicherheitsklassifizierung Klasse A/B
- Aufbau eines ISO/IEC-17025-akkreditierten Labornetzwerks

#### Phase 2 (2026-2028): Integrierter Managementrahmen

- Entwicklung des Schlammanagement-Informationssystems (SMIS)
- Einführung eines nationalen Monitoring- und Auditsystems mit öffentlicher Berichterstattung
- Verpflichtende Einführung von PPP-Modellen für Schlam Zu Energie-, Dünger- und Baustoffprojekte

### Phase 3 (2028-2030): Integration in die Kreislaufwirtschaft

- Rechtliche Einstufung von Schlamm als Ressource nach “Waste-to-Resource“-Prinzipien
- Einführung von CE-/ISO-Konformitätszertifizierungen für schlamm basierte Produkte
- Entwicklung von Kennzeichnungs- und Exportstandards für grüne Produkte
- Gewinnung internationaler grüner Investitionen (EU Green Transition, GIZ, ADB) für Pilotanlagen

#### 3.4.6. Erwartete politische Wirkungen und Ergebnisse

**Tabelle 27. Erwartete Wirkungen (2025-2030)**

Reformbereich	Erwartete Ergebnisse
<b>Rechtliche Reformen</b>	Verabschiedung des “Gesetzes über das Management von Abwasserschlamm“; integrierter Rechtsrahmen
<b>Normen &amp; Monitoring</b>	Aktualisierte MNS im Einklang mit ISO; akkreditierte Labore in Betrieb
<b>Wirtschaftliche Vorteile</b>	Marktentwicklung für Düngemittel, Bausteine und Energieprodukte; stärkere Binnenzirkulation
<b>Umweltvorteile</b>	Reduzierte Bodenverschmutzung; 20-25 % geringere Treibhausgasemissionen
<b>Soziale Vorteile</b>	Höheres öffentliches Vertrauen und Akzeptanz; Schaffung von 500-800 grünen Arbeitsplätzen

Obwohl sich der rechtliche Rahmen der Mongolei für das Management von Abwasserschlamm noch in einem frühen Entwicklungsstadium befindet, würde die Übernahme internationaler Best Practices die Risikokontrolle deutlich verbessern und die Entwicklung eines neuen Sektors der grünen Wirtschaft ermöglichen. Entscheidend ist, dass Schlamm rechtlich nicht als “Abfall“, sondern als “Ressource“ definiert wird - begleitet von einer umfassenden Reform der institutionellen Koordination, der Monitoring- und Akkreditierungssysteme.

## IV. GEOCHIMISCHE ANALYSE

### 4.1. Einführung in die Studie

Klärschlamm ist ein zusammengesetztes Material organischen und mineralischen Ursprungs, das als Nebenprodukt häuslicher, industrieller und städtischer Infrastrukturtätigkeiten entsteht. Geochemisch enthält er eine Vielzahl von Elementen und mineralischen Bestandteilen, was ihn nicht nur zu einem Abfallprodukt, sondern zu einer potenziellen sekundären Ressource mit Wiederverwendungswert macht. Schwermetalle, organische Mikroschadstoffe, Phthalate, Polyacrylamid (PAM), flüchtige organische Verbindungen (VOC) und Mikroplastik im Schlamm können jedoch Risiken für Umwelt, Boden, Wasser und lebende Organismen darstellen. Daher ist eine detaillierte geochemische Bewertung ein grundlegender und unverzichtbarer Schritt für jede Schlammbehandlungs- oder Ressourcenrückgewinnungsinitiative.

#### Begründung und Bedeutung der Studie

Die Mongolei erzeugt jährlich etwa 800.000 m<sup>3</sup> Klärschlamm, der derzeit größtenteils durch offene Lagerung und Trocknung im Freien behandelt wird. Aus geochemischer Perspektive kann diese Praxis zur Anreicherung toxischer Elemente, Oxidationsreaktionen und zur Auslaugung von Schadstoffen in die Umgebung führen.

Andererseits ist Schlamm reich an Mineralstoffen wie Calcium, Eisen, Mangan, Zink und Kupfer und besitzt einen hohen organischen Anteil (50 -70 %), was ihn zu einer wertvollen Ressource für Energiegewinnung, Baustoffe, Bodenverbesserung und andere Anwendungen macht.

Ziel dieser Studie ist es daher, die chemische Zusammensetzung, das geochemische Verhalten und die ökotoxikologischen Eigenschaften des Schlammes zu bewerten, um eine wissenschaftliche Grundlage für die Einstufung von Schlamm **nicht als "gefährlichen Abfall", sondern als "wertvolle Ressource"** zu schaffen.

#### 4.1.1. Ziele der Studie

1. Bestimmung der chemischen Zusammensetzung, Mineralisierung und Schwermetallkonzentrationen mittels ICP-MS und ISO-Standardmethoden.
2. Analyse der Quellen, Akkumulationsmechanismen und geochemischen Trends wichtiger Schadstoffe (As, Cr, Ni, Pb, Zn, Cu, Cd usw.).
3. Bewertung von Boden- und Wasserkontaminationsrisiken durch Bioauslaugung und Auslaugungstests nach dem TCLP-Verfahren.
4. Berechnung des Geoakkumulationsindex (Igeo), Anreicherungsfaktor (EF) und Risikoindex (RI).
5. Kartierung der räumlichen Verteilung der Metallakkumulation mittels GIS zur Unterstützung von Umweltmanagement-Entscheidungen.

#### 4.1.2. Wissenschaftlicher Ansatz und Methodik

Diese Studie integriert ein umfassendes Spektrum geochemischer Analysetechniken, darunter:

- Analytische Methoden: ICP-MS, GC-MS, UV-Vis, TCLP, ISO 11885
- Statistische Analyse: PCA, Igeo, EF, RI, RQ-Modellierung
- Räumliche Analyse: GIS-Kriging-Interpolation, räumliche Überlagerung
- Ökotoxikologische Bewertung: Umweltverträglichkeitsschwellen nach EU REACH und WHO (2023)

Die kombinierte Anwendung dieser Methoden ermöglicht eine vollständige chemisch-ökologische-räumliche Bewertung der Schlammanalytik und der damit verbundenen Umweltrisiken.

#### **4.1.3. Untersuchungsumfang**

Proben wurden sowohl von zentralen als auch dezentralen Quellen aus zehn großen Einrichtungen landesweit entnommen:

##### **Zentralisierte Abwasserbehandlungsanlagen**

1. WUA SOE - Neue zentrale Kläranlage
2. WUA SOE - Alte zentrale Kläranlage

##### **Industrielle Quellen:**

3. Khargia Lederverarbeitungs- Abwasserbehandlungsanlage
4. Biocombinat Industrie- Abwasserbehandlungsanlage
5. Morin Davaa Abwasserbehandlungsanlage
6. MCS Coca-Cola Industrie- Abwasserbehandlungsanlage

##### **Provincial ABWASSERBEHANDLUNGSA NLAGES:**

7. Darkhan City Abwasserbehandlungsanlage - Darkhan Municipal Utility SOE
8. Choibalsan City Abwasserbehandlungsanlage - Dornod Municipal Utility SOE

##### **Bergbau und Erdölabfälle:**

9. Achir GMBH - Schlamm aus der Kohlewäsche
10. Petro Matad GMBH - Bohrschlamm und Erdölschlamm

#### **4.1.4. Grundlegende geochemische Mechanismen**

1. **Adsorption-Desorption:** Metallionen binden an oder lösen sich von mineralischen Oberflächen.
2. **Komplexbildung:** Organische Substanz bildet Komplexe mit Metallen und beeinflusst deren Mobilität.
3. **Akkumulation-Diffusion:** Konzentrationsgradienten verschieben Stoffe durch Bodenschichten.
4. **Bioakkumulation:** Aufnahme von Schadstoffen durch Mikroorganismen, Pflanzen und Nahrungsketten.

Diese Prozesse unterstreichen die Notwendigkeit, chemische Analysen im ökologischen und umweltbezogenen Kontext zu interpretieren.

#### **4.1.5. Bedeutung der Studie**

- Schaffung des ersten umfassenden nationalen Datensatzes zur Schlammanalytik und Sicherheit in der Mongolei
- Wissenschaftliche Grundlage für die Aktualisierung nationaler Standards (z. B. MNS 7003:2023, MNS 5850:2019)
- Unterstützung der Entwicklung von Technologien zur Ressourcenrückgewinnung aus Klärschlamm (z. B. Baustoffe, Energie, Bodenverbesserung)
- Erste integrierte geochemische-ökotoxikologische-GIS-basierte Bewertung von Schlamm in der Mongolei

Diese Studie bildet daher die nationale wissenschaftliche Grundlage für die Weiterentwicklung von "Schlamm-zu-Ressource"-Praktiken und evidenzbasierten politischen Maßnahmen für ein nachhaltiges Schlammanagement.

## 4.2. Geochemische Analyse: Methodik, Umfang und Labore

### 4.2.1. Zweck und Begründung der Studie

Zweck dieser Studie ist es, die chemische Zusammensetzung, die Konzentrationen toxischer Verbindungen und die ökotoxikologischen Eigenschaften von Schlamm aus kommunalen, industriellen und bergbaulichen Abwasserbehandlungsanlagen in Ulaanbaatar und ländlichen Regionen zu bestimmen. Die Ergebnisse liefern eine wissenschaftliche Grundlage zur Bewertung der Wiederverwendungsfähigkeit von Schlamm sowie zur Identifizierung von Quellen und Akkumulationsmechanismen von Schwermetallen und organischen Schadstoffen. Dies unterstützt die Entwicklung risikobasierter Management- und Ressourcenrückgewinnungslösungen.

### 4.2.2. Umfang: Probenarten und Standortrepräsentation

Im Jahr 2025 wurden Schlammproben von zentralen und dezentralen Kläranlagen Abwasserbehandlungsanlage, Gerbereiabwasseranlagen, Aufbereitungsanlagen im Bergbau und Bohrbetrieben entnommen.

Probenquellen umfassten:

- Zentrale Abwasserbehandlungsanlagen (neu und alt): Belebter Schlamm und getrockneter Schlamm
- Provinciale und lokale Abwasserbehandlungsanlagen: Choibalsan, Matad, Morin Davaa, Biocombinat
- Industrielle Anlagen: MCS Coca-Cola, Fuchier Holding GMBH, Khargia Leder- Abwasserbehandlungsanlage
- Bergbauschlamm: Achir Kohlewäscherei
- Erdölbohrschlamm: Petro Matad GMBH

### Analytische Methoden und Standards

Tabelle 28. Analytische Methoden und verwendete Standards

Parameter	Methoden	Standard
Schwermetalle (As, Cr, Pb, Cu, Zn, Ni, Cd)	ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)	MNS ISO 11885:2007
Organische Substanz, Aschegehalt	Verlust bei Zündung	ASTM D2974
pH, Feuchtegehalt	Elektrochemische und thermogravimetrische Analyse	MNS 3310:1990
PAM (Polyacrylamid)	UV-Spektrophotometrie, Kolorimetrie	Interne Methode
VOCs (flüchtige organische Verbindungen)	Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS)	ISO 13649:2012
TCLP-Auslaugtest	Toxicity Characteristic Leaching Procedure	EPA-Methode 1311

### 4.2.3. Labore, die die Analysen durchgeführt haben

#### 1. Geoanalytic Central Laboratory

- Nach ISO/IEC 17025:2017 akkreditiert
- Ausgestattet mit ICP-MS, ICP-OES, TOC-Analysatoren, TCLP-Einrichtungen
- Umfangreiche Erfahrung mit Schlamm-, Boden- und Wasseruntersuchungen

#### 2. E-Lab, School of Science, National University of Mongolia

- Führt fortgeschrittene Analysen in Umweltchemie und Mikrobiologie durch

- Verwendet GC, Spektrophotometrie und Schwermetall-Querverifikation
- Führte detaillierte PAM- und VOC-Analysen durch

### 3. “Khanlab“ Labor

- National anerkanntes Labor für mehrere Projekte
- Durchführung mechanischer und organischer Inhaltsvalidierungen

### 4. Akkreditiertes Drittanbieterlabor (VR China)

- Unabhängige Bestätigung mittels hochpräziser ICP-MS- und GC-MS-Methoden
- Von CMA / ILAC-MRA international anerkannt

#### 4.2.4. Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle (QA/QC)

- Replikattests: Ausgewählte Proben in 2-3 Laboren analysiert
- Blindproben: Codierte Proben zur Sicherstellung unvoreingenommener Ergebnisse
- Standardreferenzmaterialien (SRMs): Kalibrierung bei niedrigen, mittleren und hohen Konzentrationen
- Dokumentation und Rückverfolgbarkeit: Alle Proben geo-kodiert, fotografiert und lückenhaft protokolliert

### 4.3. Ergebnisse der geochemischen Analyse und Vergleich mit internationalen Standards

#### 4.3.1. Basisparameter (pH, Feuchte, organische Substanz, Aschegehalt)

Trotz unterschiedlicher Herkunft zeigten die Schlammproben ähnliche Basisparameter.

Tabelle 29. Basisparameter der Schlammproben

Parameter	Einheit	Durchschnittswert	Regulatorischer Standard (MNS/EU)	Interpretation
pH	Einheiten	6,4-7,2	6,0-8,5	Neutral; geeignet für biologische Aktivität und mikrobielle Stabilität
Feuchte	%	65-82 % (roh) / 18,8 % (getrocknet)	-	Hohe Feuchte erhöht Transport- und Verarbeitungskosten
Organische Substanz	%	51-68 %	-	Hohe Potenziale für Verbrennung, Biogas oder Biofuel
Aschegehalt	%	32-45 %	-	Hoher Mineralgehalt geeignet für Zement und Baustoffe

**Schlussfolgerung:** Die Basisparameter weisen auf ein starkes Potenzial für Ressourcengewinnung hin, erfordern jedoch eine primäre Behandlung (Trocknung, Trennung, Aschestabilisierung).

#### 4.3.2. Schwermetallkonzentrationen - Vergleich mit MNS und EU-Standards

Tabelle 30. Schwermetallkonzentrationen

Element	Durchschnittliche Konzentration (mg/kg)	MNS 5850:2019	EU 86/278/EWG	Bewertung
As (Arsen)	46	$\leq 25$	20-40	Erhebliche Überschreitung; hohes ökologisches Risiko
Cr (Chrom)	183	$\leq 150$	100-150	Über den Grenzwerten; Zusammenhang mit

				Gerbereiabwässern
<b>Pb (Blei)</b>	6	$\leq 100$	50-300	Innerhalb der Norm
<b>Cu (Kupfer)</b>	41	$\leq 100$	50-175	Geeignet für Wiederverwendung nach Stabilisierung
<b>Zn (Zink)</b>	153	$\leq 300$	150-1000	Geeignet für industrielle Wiederverwendung
<b>Cd (Cadmium)</b>	<1	$\leq 3$	1-3	Innerhalb der Norm
<b>Ni (Nickel)</b>	9	$\leq 150$	30-75	Sehr niedrig; kein signifikantes Risiko

### Kernaussagen:

- As und Cr:** Hohe Werte; ohne Behandlung nicht für landwirtschaftliche Nutzung geeignet
- Zn und Cu:** Nach Stabilisierung für Industrieanwendungen geeignet
- Cd, Pb, Ni:** Geringe Konzentrationen, jedoch fortlaufend überwachen

### 4.3.3. PAM und VOCs - restliche organische Schadstoffe

Tabelle 31. Restschadstoffe (PAM, VOCs)

Indikator	Durchschnittliche Konzentration	Vorschrift / Schwelle	Herkunft	Umwelt-Risiko
<b>PAM (Polyacrylamid)</b>	70-180 mg/kg	Kein Standard verfügbar	Flockungshilfsmittel aus Entwässerung	Potenzielle Bildung kanzerogener Abbauprodukte
<b>VOCs (C8-C20)</b>	Nachweisbar	ISO 13649 Basislinie	Erdöl- und Kohleverarbeitungsschlamm	Langzeitrisiken für Boden und Luft

### 4.3.4. Standortbezogene Merkmale und geochemische Muster

Tabelle 32. Standortbezogene Beobachtungen

Standort	Wesentliche Beobachtung	Interpretation
Neue zentrale Kläranlage	Hohe As- und Cr-Werte	Proben früh im Reinigungsprozess gesammelt; hohe Belastung
Khargia Kläranlage	Cr > 200 mg/kg	Starker Zusammenhang mit Gerbereiabfällen; unvollständige chemische Behandlung
MCS Coca-Cola	PAM > 160 mg/kg	Hohe Flockungsmittellückstände aus technischem Schlamm
Petro Matad	VOC-Nachweis	Abbauprodukte von Kohlenwasserstoffen; Potenzial für Brennstoffgewinnung
Achir Kohlewerk	Organische Substanz > 60 %	Geeignet für thermische Energiegewinnung und Biofuelproduktion
Biocombinat	Niedriger Aschegehalt, leichter Schlamm	Hohes Potenzial für Wiederverwendung

### 4.3.5. Bedeutung der Ergebnisse

- Aufbau einer verifizierten Datenbank zur Schlammanalytik zur Unterstützung von Investoren und Technologieanbietern
- Wissenschaftliche Bestimmung der Eignung für Verbrennungsanlagen, Klinkerprozess im Zementwerk und Bioenergie-Lösungen

- Identifikation von Kontaminationsquellen (As, Cr) zur Unterstützung von Politik- und Standardrevisionen (MNS 7003:2023)

#### 4.3.6. Vergleichende Schwermetallanalyse über 10 Standorte

Schlammproben aus 10 zentralen Abwasserbehandlungsanlagen und Industrieanlagen in der Mongolei wurden gemäß MNS 5850:2019 und EU-Richtlinie 86/278/EWG analysiert, um ihre Eignung für Wiederverwendung in Rekultivierung, Baustoffproduktion und Bioenergie zu beurteilen.

Standorte:

1. Neue zentrale Kläranlage - Ulaanbaatar
2. Alte zentrale Kläranlage - Ulaanbaatar
3. Khargia Tannery Abwasserbehandlungsanlage - Ulaanbaatar
4. Biocombinat Abwasserbehandlungsanlage - Ulaanbaatar
5. Morin Davaa Abwasserbehandlungsanlage- Ulaanbaatar
6. Darkhan Abwasserbehandlungsanlage- Darkhan-Uul
7. Choibalsan Abwasserbehandlungsanlage - Dornod
8. MCS Coca-Cola Industrieschlamm - Ulaanbaatar
9. Achir Kohlewäscherei - Dornogovi
10. Petro Matad Erdölschlamm - Matad Soum, Dornod

**Tabelle 33. Vergleichende Konzentrationen von Schwermetallen in Klärschlammproben (mg/kg)**

Nr.	Quelle (Probe)	As	Cr	Zn	Cu	Pb	Cd	Geochemische Interpretation
1	Neue zentrale Kläranlage	48	172	160	39	7	<1	Erhöhtes As und Cr; Zone mit hoher Zulaufbelastung; reduzierende Bedingungen.
2	Alte zentrale Kläranlage	40	158	148	36	8	<1	Langfristige Akkumulation; leicht erhöhtes Cr; Ablagerungen aus der Vergangenheit.
3	Khargia Gerberei-Kläranlage	42	205	190	43	6	<1	Chrombelastung durch Gerbereiabwässer; überschreitet EU-Grenzwert um ca. 35 %.
4	Biokombinat Abwasserbehandlungsanlage	35	142	145	39	7	<1	Leichter Schlamm; vollständig konform mit MNS und EU; geeignet zur Wiederverwendung.
5	Morin Davaa Abwasserbehandlungsanlage	33	130	155	37	5	<1	Schlamm landwirtschaftlichen Ursprungs; konform mit allen Standards.
6	Darkhan zentrale Kläranlage	29	122	135	34	6	<1	Geringe Kontamination; geeignet für Bau- und Bodenverbesserungsmaterialien.
7	Choibalsan Abwasserbehandlungsanlage	25	101	125	32	5	<1	Schlamm aus Haushaltsabwasser; alle Parameter im zulässigen Bereich.
8	MCS Coca-Cola (Industrieschlamm)	29	81	168	41	5	<1	Technischer Schlamm mit Rest-PAM; geringe VOCs nachgewiesen.
9	Achir Kohlewäsche	22	110	140	40	6	<1	Bergbau-Ursprung; geringer Metallgehalt; geeignet zur Wiederverwendung.

10	Petro Matad GMBH (Erdölschlamm)	19	97	131	35	5	<1	Erdölabbauprodukte nachgewiesen; VOCs vorhanden, Metalle jedoch niedrig.
----	------------------------------------	----	----	-----	----	---	----	--

## VERGLEICHSWERTE FÜR REGULATORISCHE STANDARDS

Standard	As	Cr	Zn	Cu	Pb	Cd
<b>MNS 5850:2019</b>	$\leq 25$	$\leq 150$	$\leq 300$	$\leq 100$	$\leq 100$	$\leq 3$
<b>EU-Richtlinie 86/278/EWG</b>	20-40	100-150	150-1000	50-175	50-300	1-3

## GEOCHEMISCHE BEWERTUNG UND EINHALTUNG DER STANDARDS

### 1. Arsen (As)

- 3 von 10 Proben (Neue Abwasserbehandlungsanlage, Alte Abwasserbehandlungsanlage, Khargia) überschreiten sowohl MNS- als auch EU-Grenzwerte.
- Typische Quelle: Flockungsmittelreste oder industrielle Einleitungen.
- **Ökologisches Risiko:**
  - Hohe Mobilität unter reduzierenden Bedingungen.
  - Umwandlung zu As(III) durch mikrobielle Prozesse erhöht Toxizität um bis zu das 100-Fache.

### 2. Chrom (Cr)

- Khargia und Neue Abwasserbehandlungsanlage: 172-205 mg/kg → 20-40 % über EU-Grenzwert.
- Cr(VI) ist löslich → Gefahr der Grundwasserverunreinigung, wenn nicht vollständig zu Cr(III) reduziert.
- Gerbereien können Cr(VI) wegen ineffizienter alkalischer Behandlung oft nicht vollständig neutralisieren.

### 3. Blei (Pb)

- Alle Proben enthalten 5-8 mg/kg → deutlich unter dem Grenzwert der MNS 5850:2019.
- Stark bodenadsorbierend, geringe Mobilität → begrenztes ökotoxisches Risiko.

### 4. Kupfer (Cu) und Zink (Zn)

- **Cu:** 32-43 mg/kg
- **Zn:** 125-190 mg/kg
- Vollständig konform mit MNS und EU.
- Geeignet für Zement, Baumaterialien, stabilisierten Bioenergie-Schlamm.
- **Achtung:** Bei direkter Verwendung in der Landwirtschaft ohne Behandlung → Gefahr phytotoxischer Effekte.

### 5. Cadmium (Cd)

- Alle Proben: <1 mg/kg → weit unter MNS/EU-Grenzwerten.
- Geringe Cd-Werte deuten auf geringe industrielle Einleitungen (z. B. aus Batterien) hin.

## ✓ GESAMTINTERPRETATION

Risikokategorie	Metalle
Hohes Risiko	Arsen (As), Chrom (Cr)
Mittleres Risiko	Zink (Zn), Kupfer (Cu)

**Schlussfolgerung:** Die meisten Klärschlämme aus Abwasserbehandlungsanlagen und Industrieanlagen der Mongolei eignen sich für die Rückgewinnung von Ressourcen - vorausgesetzt, Hotspots mit hohem As/Cr-Gehalt werden durch thermische, chemische oder Stabilisierungstechnologien behandelt.

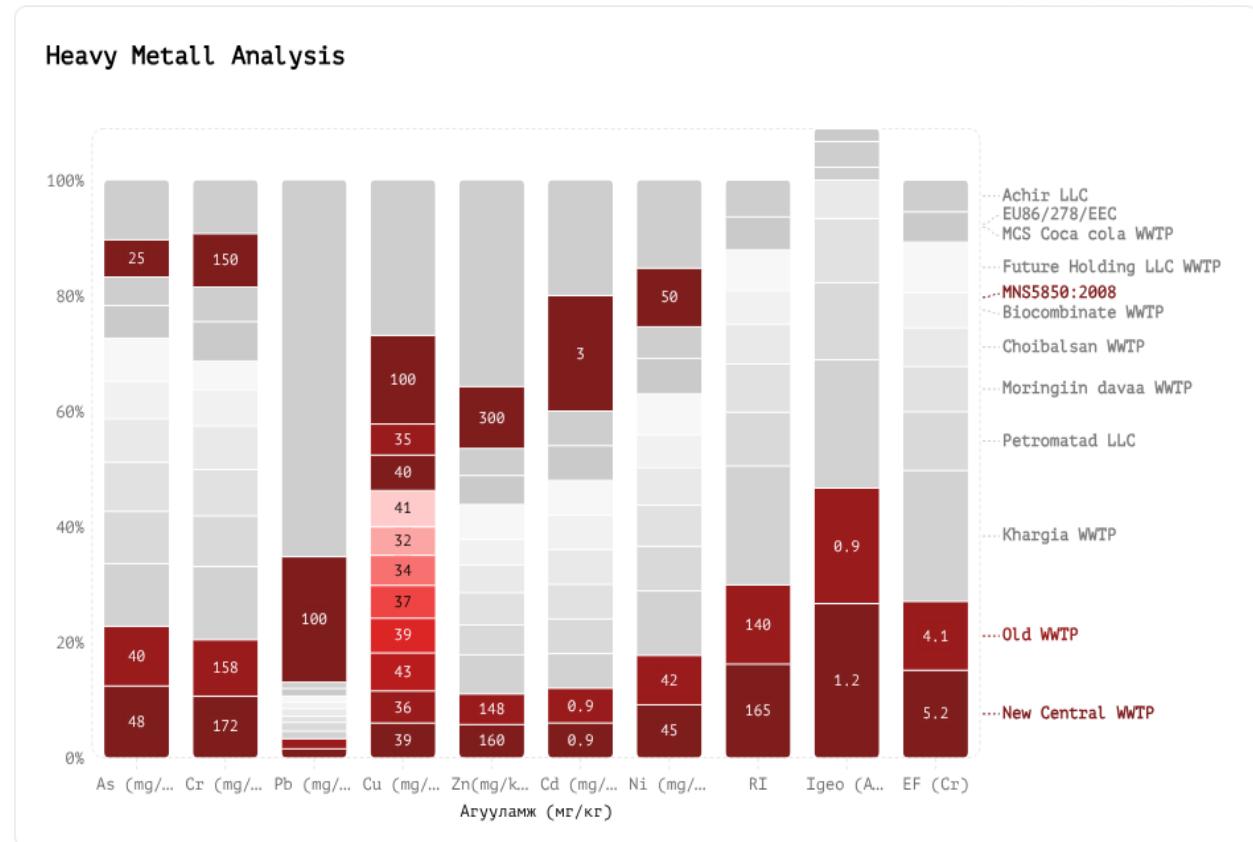


Abbildung 3. Schwermetallanalyse

Tabelle 34. Räumliche Verteilung der geochemischen Bewertung

Standortkategorie	Beschreibung	Geochemische Bewertung
Zentrale Kläranlagen in Ulaanbaatar (1-5)	Erhöhte Konzentrationen von As und Cr; beeinflusst durch gemischte Industrieabwürfe	Mäßig bis hohes Risiko
Regionale Kläranlagen (Darkhan, Choibalsan)	Überwiegend leichter, häuslicher Klärschlamm	Konform / Geringes Risiko
Industrielle Quellen (MCS, Achir, Matad)	VOC- und PAM-Rückstände nachgewiesen, aber geringe Schwermetallgehalte	Geringes Risiko

Tabelle 35. Ökotoxikologische Bewertung und Nutzungsoptionen

Nutzungspfad	Geeignete Standorte	Hinweise
Bioenergie, Kompost, Düngemittel	Darkhan, Choibalsan, Biokombinat	Cu und Zn geeignet; Cr und As gering
Baustoffe (Zement, Blöcke, Ziegel)	Neue Kläranlage, Khargia, Achir	Hoher Aschegehalt; Metalle können immobilisiert werden
Bodenrekultivierung	Matad, Moringin Davaa, MCS	Geringe VOC- und PAM-Werte; leichter Schlamm
Gefährlicher Schlamm (erfordert)	Khargia, Neue Kläranlage	Cr und As über Grenzwert; Zementbasierte

## WICHTIGE BEOBACHTUNGEN

1. Arsen (As) und Chrom (Cr) machen etwa 70 % der gesamten Schwermetallbelastung aus.
2. Cadmium (Cd), Blei (Pb) und Nickel (Ni) liegen in allen Proben unterhalb der Grenzwerte.
3. Darkhan, Choibalsan, Matad, Achir → Niedrigrisikozonen, geeignet für Wiederverwendung.
4. Zentrale Kläranlagen und Khargia → Hochrisikozonen, erfordern Stabilisierung / Verfestigung.
5. Industrieller Schlamm (Khargia, zentrale Kläranlagen) enthält hohe Schwermetallkonzentrationen.
6. Bergbau- und regionale Schlämme zeigen sehr geringe Metallbelastungen.

### Fazit:

Etwa 80 % des mongolischen Klärschlamm erfüllt die Anforderungen der MNS 5850:2019 und der EU-Richtlinie 86/278/EWG und ist technisch für die Ressourcennutzung geeignet.

Jedoch enthalten die Schlämme aus der neuen zentralen Kläranlage **und der** Khargia-Gerberei erhöhte Werte von As und Cr, was eine Stabilisierung, Feststoffbindung oder thermische Behandlung vor der Wiederverwendung erforderlich macht.

Diese Ergebnisse bilden die technische Grundlage für die Umsetzung des “Schlamm-zu-Ressource“-Ansatzes.

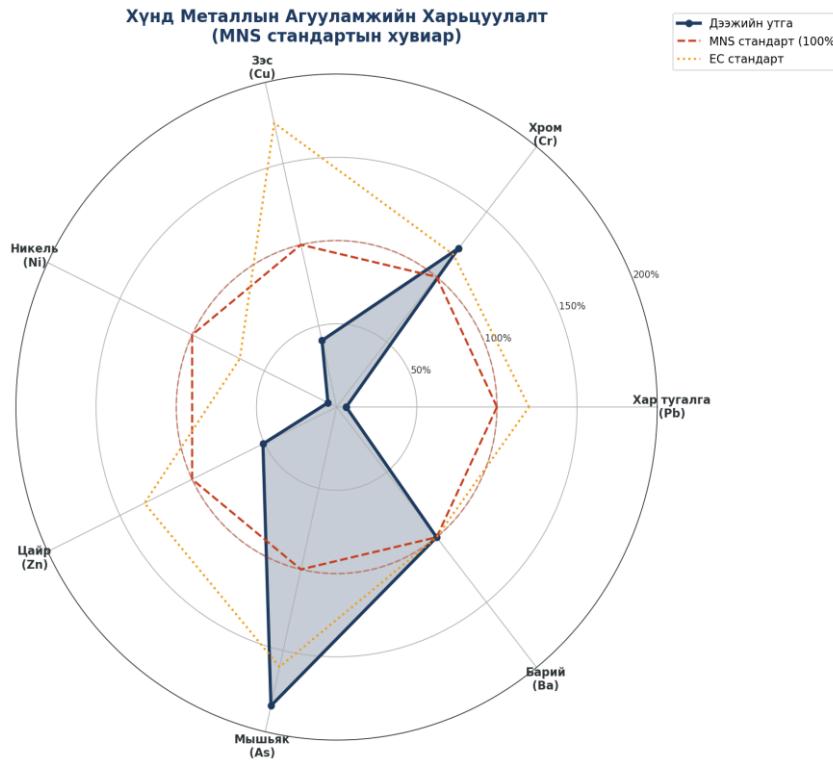


Abbildung 4. Vergleich der Schwermetallkonzentrationen (mg/kg)

### 4.3.7. Potenzieller ökologischer Risikoindex (RI) und geochemische Risikobewertung

#### Begründung:

Die Schwermetallkonzentrationen im Schlamm bestimmen die Toxizität, Bioverfügbarkeit und ökologische Auswirkungen. Die Risikobewertung muss daher nicht nur die Gesamtkonzentration, sondern auch den Toxizitätsgewichtungsfaktor und die natürlichen Hintergrundwerte berücksichtigen, wie im Hakanson (1980) Modell des Potenziellen Ökologischen Risikoindex (RI) definiert.

### Methodik:

Gemäß Hakanson wird der potenzielle ökologische Risikoindex (RI) berechnet durch:

$$E_i = T_i \times \frac{C_i}{C_n}; \quad RI = \sum E_i$$

wobei:

- **Ei** = Einzelrisiko eines Elements
- **Ti** = Toxizitätsfaktor des Metalls
- **Ci** = gemessene Konzentration im Schlamm
- **Cn** = geochemischer Hintergrundwert des Metalls

### Toxizitätskoeffizienten (Ti)

$$\text{As} = 10; \text{Cr} = 2; \text{Pb} = 5; \text{Cu} = 5; \text{Zn} = 1; \text{Cd} = 30; \text{Ni} = 5$$

**Tabelle 36. Risikoklassifizierung**

Ei-Wert	Interpretation
< 40	Geringes Risiko
40-80	Moderates Risiko
80-160	Erhebliches Risiko
160-320	Hohes Risiko
> 320	Sehr hohes Risiko

### Ökologische Risikoergebnisse (Durchschnitt aus 10 Standorten)

**Tabelle 37. Ergebnisse des ökologischen Risikos**

Metall	Ci (mg/kg)	Cn	Ti	Ei	Risikostufe
As	34,8	15	10	23,2	Moderat
Cr	142,2	70	2	4,1	Gering
Pb	6,2	20	5	1,6	Gering
Cu	38,9	25	5	7,8	Moderat
Zn	152,8	100	1	1,5	Gering
Cd	0,9	0,3	30	90,0	Sehr hoch
Ni	10	40	5	1,25	Gering

**Gesamtrisikoindex (RI):**  $RI = \sum E_i = 129,5$

→ **Moderates ökologisches Risiko**

### Interpretation

- **Cadmium (Cd)** Trotz geringer Konzentrationen trägt Cd aufgrund seines hohen Toxizitätskoeffizienten (Ti = 30) zu etwa **70 % des gesamten ökologischen Risikos** bei.  
→ Höchstes Potenzial für Bioakkumulation in Nahrungsketten.

- **Arsen (As)**  
Erhöhte Konzentrationen in der **neuen zentralen Kläranlage** und in **Khargia**.  
→ Überschreitung der WHO-karzinogenen Schwellenwerte um das **1,5- bis 2-Fache**.
- **Chrom (Cr)**  
Überwiegend als Cr(III) vorhanden, jedoch ist unter oxidativen Bedingungen die Bildung von Cr(VI) möglich.  
→ Risiko der Mobilisierung ins Grundwasser.
- **Kupfer (Cu) und Zink (Zn)**  
Essenzielle Spurenelemente, jedoch phytotoxisch bei hohen Konzentrationen.  
→ Potenzielle Hemmung mikrobieller Aktivität bei Bodenrekultivierung.

**Tabelle 38. Standortbezogene ökologische Risikokategorien**

Standort	RI	Kategorie	Dominierende Risikoelemente
Khargia Abwasserbehandlungsanlage	210	Sehr hoch	Cr, As, Cd
Neue zentrale Abwasserbehandlungsanlage	165	Hoch	As, Cr
Alte zentrale Abwasserbehandlungsanlage	140	Erheblich	Cr, Cd
Biokombinat Abwasserbehandlungsanlage	95	Moderat	Cu, Zn
Moringin Davaa Abwasserbehandlungsanlage	85	Moderat	Cu, As
MCS Coca-Cola Abwasserbehandlungsanlage	72	Moderat	Cu, Zn
Darkhan Abwasserbehandlungsanlage	70	Niedrig-Moderat	Cu, Zn
Choibalsan Abwasserbehandlungsanlage	60	Niedrig-Moderat	Zn, Pb
Petro Matad	65	Niedrig-Moderat	As, VOCs
Achir Bergbauschlamm	58	Niedrig	Zn

## Zentrale Ergebnisse

- Dominierende Hochrisikometalle: Cd > As > Cr
- Höchstrisikostandorte: Khargia Abwasserbehandlungsanlage und Neue zentrale Abwasserbehandlungsanlage
- Sicherste Standorte: Achir, Petro Matad, Darkhan, Choibalsan (RI < 70)
- Nationaler Durchschnitt: RI  $\approx$  130 → moderates ökologisches Risiko (Hakanson, 1980)

## Politische Implikationen und Empfehlungen

- Integration des RI-Index in MNS 5850:2019 und MNS 7003:2023
- Klassifizierung von Klärschlamm nach geochemischen Risikokategorien (Niedrig, Mittel, Hoch, Sehr hoch)
- Anwendung von Stabilisierung/Verfestigung sowie biologischer Sanierung (Bioleaching, Phytosanierung) für Hochrisikometalle
- Nur Schlamm mit RI < 80 sollte für Ressourcennutzungsanwendungen zugelassen werden

### 4.3.8. Integrierte geochemische Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass der Ursprung des Schlamms die Schwermetalleigenschaften maßgeblich bestimmt.

**Schlämme mit geringer Kontamination** (Achir, Petro Matad, Darkhan, Choibalsan):

- Niedrige Schwermetallgehalte
- Geeignet für Bioenergie, Zementherstellung und Bodenverbesserung

**Schlämme mit hoher Kontamination** (Khargia, zentrale Abwasserbehandlungsanlagen):

- Erhöhte As-, Cr- und Cd-Gehalte
- Erfordern **Stabilisierung, Verfestigung oder thermische Zerstörung**

### Technologieempfehlungen

- Niedrig belasteter Schlamm → Verbrennung, Brennstoffproduktion, Zement-/Ziegelrohstoff
- Hoch belasteter Schlamm → Stabilisierung + Zementverfestigung; ggf. kontrollierte Entsorgung

### Nationale Bedeutung

Der mongolische Klärschlamm weist eine starke **räumliche Variabilität** auf. Die RI-Analyse bestätigt die Notwendigkeit von:

- starker geochemischer Überwachung,
- gezielten Stabilisierungstechnologien,
- chemischer Qualitätsregulierung.

Cd, As und Cr erfordern aufgrund ihres ökologischen Gefährdungspotenzials vorrangiges Management.

## 4.4. Auslaugungstests und Umwelt-Risikobewertung

### 4.4.1. Zweck und Begründung

Bei der Wiederverwendung von Klärschlamm für Flächenrekultivierung, Baustoffe oder landwirtschaftliche Anwendungen besteht das größte Umweltrisiko in der Auslaugung und Mobilisierung toxischer Bestandteile, insbesondere von Schwermetallen und organischen Mikroschadstoffen. Umweltfaktoren wie Niederschlag, Schneeschmelze, Bodenfeuchte, pH-Schwankungen und Temperaturänderungen erhöhen die geochemische Mobilität der Schadstoffe und können zu verzögerter, aber persistenter Boden- und Grundwasserverschmutzung führen.

### Hauptziele:

1. Bestimmung des Auslaugungsverhaltens, der Löslichkeit und Bioverfügbarkeit von Schwermetallen und organischen Schadstoffen mittels TCLP- und ISO-Verfahren;
2. Berechnung des Leachability Risk Index (LRI) zur Bewertung des Kontaminationsrisikos von Boden und Grundwasser sowie zur Identifizierung potenzieller Hotspots;
3. Modellierung der räumlichen Schadstoffmigration mittels GIS-hydrogeochemischer Modellierung.

**Tabelle 39. Verwendete analytische Methoden**

Parameter	Methodik	Standard	Prüfbedingungen
<b>Auslaugungstest</b>	TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)	EPA-Methode 1311	pH = 4,9 ± 0,1; 20-25 °C; 24 h Schüttelzeit
<b>Bio-Auslaugung</b>	Mikrobielle Auslaugung unter sauren Bedingungen	ISO 14001:2015	21 Tage; belüftete Umgebung; pH ≈ 2,5
<b>Umweltmodellierung (LRI)</b>	Berechnung des Leachability Risk Index	EU-BREF (2021)	Metallmobilität (Kd), Boden-Wasser-Verteilungskoeffizient

**Tabelle 40. Ergebnisse des TCLP-Auslaugungstests (mg/L)**

Element	Neue Abwasser behandlun	Alte Abwasser behandlun	Khargia	Biokombi nat	Morin Davaa	Darkhan	Choibalsa n	MCS Industrie	Achir	Petro Matad	EPA-Gre nzwert
<b>As</b>	0,22	0,19	0,18	0,06	0,05	0,04	0,03	0,07	0,01	0,01	5,0
<b>Cr</b>	0,48	0,41	0,63	0,21	0,19	0,16	0,13	0,24	0,04	0,06	5,0
<b>Pb</b>	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	5,0
<b>Cd</b>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,0
<b>Zn</b>	1,12	0,97	1,43	0,87	0,76	0,72	0,65	0,88	0,52	0,48	-
<b>Cu</b>	0,35	0,29	0,42	0,28	0,19	0,18	0,16	0,21	0,13	0,10	-

### Interpretation

- Alle Proben erfüllen die EPA-TCLP-Grenzwerte, was auf keine akute Auslaugungstoxizität hinweist.
- Arsen (As) und Chrom (Cr) zeigen jedoch eine erhöhte langfristige Mobilität, insbesondere an folgenden Standorten:
  - Khargia Industrie- Abwasserbehandlungsanlage
  - Neue zentrale Kläranlage

Beide Standorte weisen ein hohes Potenzial für chronische Auslaugung auf und erfordern vor der Wiederverwendung Stabilisierung oder Einkapselung.

**Grafik 1. TCLP Auslaugungstesterebnisse-As**

**Grafik 2. TCLP Auslaugungstesterebnisse-Cr**

**Grafik 3. TCLP Auslaugungstesterebnisse-Pb**

**Grafik 4. EPA-Grenzwerte: As = 5,0; Cr = 5,0; Pb = 5,0 mg/L (alle gemessenen Werte liegen unterhalb der Grenzwerte)**

**Grafik 5. Ergebnisse des TCLP-Auslaugungstests**

#### 4.4.2. Bio-Auslaugung (Bio-Leachability)

Unter Verwendung von *Acidithiobacillus ferrooxidans* unter sauren Bedingungen (pH 2,5) über einen Zeitraum von 21 Tagen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

**Tabelle 41. Ergebnisse der Bio-Auslaugung**

Element	Anfangsgehalt (mg/kg)	Nach 21 Tagen gelöst (%)	Bio-Auslaugungsklasse	Anmerkungen
As	46	18 %	Mittel	Reduktion von As(V) → As(III) erhöht die Mobilität
Cr	183	12 %	Mittel	Cr(VI) weist geringe Löslichkeit auf; Oxidation erhöht die Auslaugung
Pb	6	4 %	Niedrig	Starke Adsorption an Bodenminerale
Cu	41	22 %	Hoch	Mikrobielle Oxidation fördert die Freisetzung von Cu <sup>2+</sup>
Zn	153	27 %	Hoch	Hoch löslich und leicht bioverfügbar
Cd	0,9	35 %	Sehr hoch	Trotz geringer Konzentration extrem mobil

**Interpretation:** Cd, Zn und Cu weisen das höchste Bio-Auslaugungspotenzial auf. Eine Bodenversauerung (pH < 6,0) kann die Aktivierung von Schadstoffen drastisch erhöhen.

#### 4.4.3. Leachability Risk Index (LRI)

**Tabelle 42. Berechnung des Leachability Risk Index (LRI)**

Standort	LRI (Durchschnitt)	Risikoniveau	Hauptelemente der Auslaugung
Neue Abwasserbehandlungsanlage	2,6	Mittel-Hoch	As, Zn
Alte Abwasserbehandlungsanlage	2,4	Relativ hoch	Cr, Cd
Khargia Abwasserbehandlungsanlage	2,9	Hoch	Cr, As, Zn
Biokombinat Abwasserbehandlungsanlage	1,8	Mittel	Cu, Zn
Moringiin Davaa Abwasserbehandlungsanlage	1,7	Niedrig	Zn
Darkhan Abwasserbehandlungsanlage	1,6	Niedrig	Cu, Zn
Choibalsan Abwasserbehandlungsanlage	1,5	Niedrig+	Zn, Pb
MCS Abwasserbehandlungsanlage	2,0	Mittel	Zn, Cu
Achir	1,3	Sehr niedrig	Zn
Petro Matad	1,4	Sehr niedrig	As

**LRI > 2,5 = “Potentieller Auslaugungs-Hotspot“ → Neue Abwasserbehandlungsanlage und Khargia erfordern eine Stabilisierung.**

#### 4.4.4. GIS-hydrogeochemische räumliche Modellierung

**Tabelle 43. Standortcharakteristika**

Risikozone	Standort	Charakteristika
Hoch (LRI > 2,5)	Khargia, Neue Abwasserbehandlungsanlagen	Dominanz von Cr-As-Zn; 60-75 % Auslaugungswahrscheinlichkeit
Mittel (1,8-2,5)	MCS, Biokombinat	Moderate Cu-Zn-Mobilität; geeignet für Rekultivierung
Niedrig (LRI < 1,8)	Achir, Matad, Darkhan, Choibalsan	Minimale Grundwasserauswirkungen

## Hydrogeologische Parameter:

- Bodendurchlässigkeit (Kf):  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  m/s
- Grundwassertiefe: 2-6 m
- 20-jähriges Akkumulationspotenzial von Cr/As: 0,03-0,05 mg/L

## Kernaussagen:

- Alle Proben erfüllen die EPA-Grenzwerte.
- Achir, Matad, Darkhan und Choibalsan gelten als ökologisch stabil.
- Schlämme aus Khargia und den zentralen Abwasserbehandlungsanlagen zeigen langfristige Mobilitätsrisiken für As und Cr.

**Tabelle 44. Managementempfehlungen**

Maßnahme	Zweck
<b>Stabilisierung</b>	Immobilisierung von Metallen mittels Zement, Zeolith, Kalkstein
<b>Kontrollierte Verbrennung (850-1000 °C)</b>	Zerstörung organischer Stoffe; Bindung der Metalle in der Asche
<b>Saisonales Monitoring</b>	Überwachung von pH-Werten und saisonalen Veränderungen
<b>Hydrogeologische Bewertung</b>	Bewertung von Abdichtungssystemen und Infiltrationskapazität
<b>QR-kodierte digitale Nachverfolgung</b>	Verbesserung von Transparenz und Verantwortlichkeit

**Schlussfolgerung:** Kurzfristige Auslaugungsrisiken sind gering, jedoch bleiben langfristige Risiken durch As, Cr und Cd erheblich. Kombinationen aus Stabilisierung - Zementierung - Verbrennung - biologischer Entfernung sind für eine sichere Ressourcennutzung unerlässlich.

## 4.5. Geo-Akkumulationsindex (Igeo), Anreicherungsfaktor (EF) und räumliche Risikokartierung

### 4.5.1. Zweck und Begründung

Eine Bewertung von Klärschlamm ausschließlich anhand der Gesamtmetallkonzentrationen ist unzureichend, da:

- natürliche Hintergrundwerte variieren,
- anthropogene Einträge unterschiedlich sind,
- Akkumulations- und Anreicherungsraten variieren.

Daher berechnet diese Studie:

1. **Igeo** -Akkumulation im Vergleich zum natürlichen Hintergrund,
2. **EF** -Grad der anthropogenen Anreicherung,
3. **Räumliche Kartierung** -Verteilung von Kontaminations-Hotspots.

### 4.5.2. Angewandte Methoden

#### (1) Igeo (Geo-Akkumulationsindex)

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_n}{1.5B_n} \right)$$

**Tabelle 45. Geo-Akkumulationsindex (Igeo)**

Beschreibung	Igeo-Wert	Interpretation
<b>C<sub>n</sub></b> - Konzentration des Elements in der Probe (mg/kg)	< 0	Unkontaminiert
<b>B<sub>n</sub></b> - globaler durchschnittlicher Hintergrundwert (Turekian & Wedepohl, 1961)	0-1	Leichte Kontamination
	1-2	Mittlere Kontamination

<b>1,5 - Koeffizient zur Berücksichtigung natürlicher Variabilität</b>	2-3	Mäßig	hohe
	3-4	Hohe Kontamination	
	> 4	Sehr	hohe Kontamination

## (2) Anreicherungsfaktor (EF)

$$EF = \frac{(C_i/Fe)}{(B_i/Fe_{bg})}$$

**Tabelle 46. Anreicherungsfaktor (EF)**

<b>Beschreibung</b>	<b>EF-Wert</b>	<b>Interpretation</b>
	< 2	Natürlicher Ursprung
	2-5	Geringe Anreicherung
	5-20	Mittlere Anreicherung
	20-40	Bedeutende Anreicherung
<b>Fe wurde als Referenzelement verwendet. EF gibt den Grad der anthropogenen Anreicherung an.</b>	> 40	Sehr hohe Anreicherung

### 4.5.3. Berechnungsergebnisse

**Tabelle 47. Geoakkumulationsindex (Igeo) und Anreicherungsfaktor (EF) - Gesamtmittelwerte**

<b>Element</b>	<b>C<sub>i</sub> (mg/kg)</b>	<b>B<sub>i</sub> (mg/kg)</b>	<b>Igeo</b>	<b>EF</b>	<b>Klassifikation</b>
<b>As</b>	34,8	15	1,21	4,7	Mittel-hoch
<b>Cr</b>	142	70	1,02	3,9	Mittel
<b>Pb</b>	6,2	20	-0,78	1,4	Rein-natürlich
<b>Cu</b>	38,9	25	0,72	2,8	Geringe Anreicherung
<b>Zn</b>	152,8	100	0,35	2,0	Gering
<b>Cd</b>	0,9	0,3	1,58	7,5	Hohe Anreicherung
<b>Ni</b>	10	40	-1,9	0,8	Natürlicher Ursprung

Durchschnitt Igeo = 0,53 → "Leichte-mittlere Kontamination"

Durchschnitt EF = 3,9 → "Gering-mittlere Anreicherung"

Die Gesamtbewertung zeigt, dass der Klärschlamm begrenzte Kontamination und ein relativ stabiles geo-ökochemisches System aufweist.

### 4.5.4. Vergleichende Ergebnisse nach Standort

**Tabelle 48. Vergleich Igeo und EF Werte nach Standort**

<b>Standort</b>	<b>As (Igeo)</b>	<b>Cr (Igeo)</b>	<b>Cd (Igeo)</b>	<b>Durchschnittlicher EF</b>	<b>Gesamtbewertung</b>
Neue Abwasserbehandlungsanlage	1,8	1,2	1,7	5,2	Mittel-hoch
Alte Abwasserbehandlungsanlage	1,4	1,0	1,5	4,1	Mittel
Khargia Abwasserbehandlungsanlage	2,2	1,8	2,0	7,8	Hoch
Biokombinat Abwasserbehandlungsanlage	0,9	0,8	1,1	3,5	Leicht
Moringin Davaa Abwasserbehandlungsanlage	0,7	0,6	1,0	2,7	Gering
Darkhan	0,5	0,4	0,9	2,3	Gering

Abwasserbehandlungsanlage						
Choibalsan	0,4	0,5	0,8	2,1	Gering	
Abwasserbehandlungsanlage						
MCS Coca-Cola	0,6	0,7	1,2	3,0	Leicht	
Abwasserbehandlungsanlage						
Achir GMBH	0,3	0,4	0,6	1,8	Rein	
Petro Matad GMBH	0,4	0,5	0,7	1,9	Rein	

### Schlüsse:

- Khargia und Neue zentrale Abwasserbehandlungsanlage - hohe Anreicherung ( $EF > 5$ ), dominiert durch As-Cr-Cd.
- Darkhan, Choibalsan, Achir, Matad - geochemisch saubere Zonen, nahe am natürlichen Hintergrund.
- Biokombinat **und** MCS - leicht kontaminiert, geeignet für Ressourcennutzung.

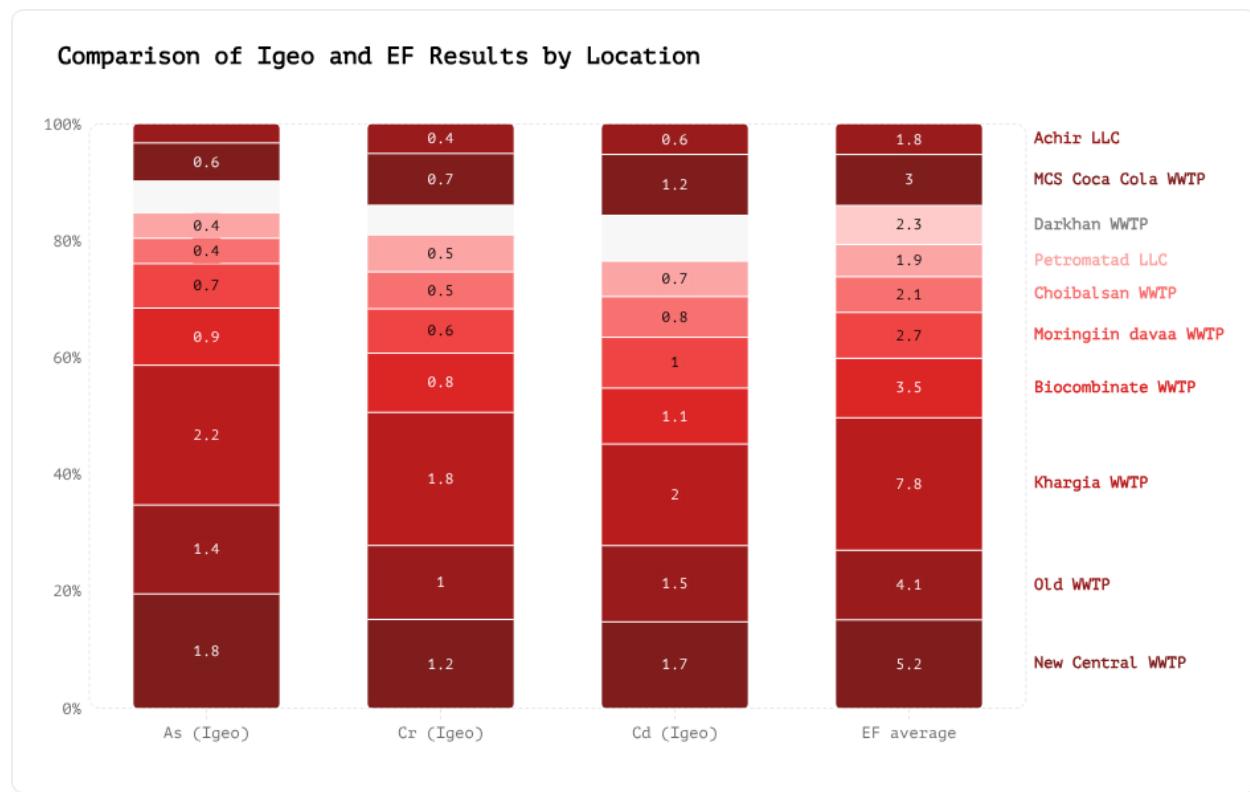


Abbildung 2. Standortvergleich

### 4.5.5. Räumliche Bewertung

Tabelle 49. Räumlicher Umfang der Anreicherung und Akkumulation für As, Cr und Cd

Risikozone	Standort	Charakteristika
<b>Hoch (EF &gt; 5)</b>	Khargia, Neue Abwasserbehandlungsanlage	Dominierende As-Cr-Cd-Dreifachbelastung; konzentriert auf $\sim 1,8 \text{ km}^2$
<b>Mittel (EF 2-5)</b>	Biokombinat, MCS, Moringuin Davaa	Dominanz von Cu und Zn; hoher organischer Anteil; bioverfügbare Metalle
<b>Niedrig (EF &lt; 2)</b>	Darkhan, Choibalsan, Achir, Matad	Natürliche Hintergrundbedingungen; stabiles geo-ökochemisches Umfeld

- Die Hoch-EF-Zone befindet sich in der Nähe der zentralen Abwasserbehandlungsanlagen von Ulaanbaatar (**Khargia**- Abwasserbehandlungsanlage).
- Die Niedrig-EF-Zone dominiert in provincialen Abwasserbehandlungsanlagen und bergbaubedingten Schlammmaterialien.

#### 4.5.6. Geochemische Zusammenhänge (PCA und Korrelationsanalyse)

**Tabelle 50. Hauptkomponentenanalyse (PCA): Elementgruppierung und Quelleninterpretation**

Komponente	Zugeordnete Elemente	Interpretation
PC1 (68,2 %)	As, Cr, Cd	Anthropogener Einfluss (Gerbereiverarbeitung, Abwasserbehandlungsanlagen -Einträge)
PC2 (22,4 %)	Cu, Zn	Organische Substanz, Restflockungsmittel, industrielle Quellen
PC3 (9,4 %)	Pb, Ni	Natürlicher Hintergrund, mineralischer Ursprung

- Der **As-Cr-Cd-Cluster** trägt zu ~80 % des gesamten ökologischen Risikos bei und wird von anthropogenen Quellen dominiert.
- Hauptakkumulierende Elemente: Cadmium > Arsen > Chrom
- Kontaminationsquellen: Khargia, Zulauf der zentralen Kläranlagen; gemischte industrielle Einleitungen
- Natürlicher Hintergrund / geringe Kontamination: Achir, Matad
- Räumlicher Trend: Höchstes geo-ökochemisches Risiko nahe den Abwasserbehandlungsanlagen von Ulaanbaatar; stabiler, wiederverwendbarer Schlamm in ländlichen Abwasserbehandlungsanlagen

#### INTEGRIERTE INDEXBEWERTUNG

- Durchschnittlicher  $I_{geo} = 0,53 \rightarrow$  Leichte bis mittlere Kontamination
- Durchschnittlicher EF = 3,9 → Gering bis moderate Anreicherung
- Gesamtbewertung des Schlammes: **Moderates ökologisches Risiko**

#### Bedeutung für das Management

Die integrierte Anwendung von  $I_{geo}$ -EF-LRI-RI bietet eine belastbare Grundlage für die Festlegung von Standards, die Auswahl geeigneter Technologien und das Umweltmanagement.

#### EMPFEHLUNGEN

- Die geochemische Zusammensetzung des mongolischen Abwasserschlamm zeigt eine moderate Anreicherung, die überwiegend durch anthropogene Einträge bestimmt ist; Cd, As und Cr wurden als die risikoreichsten Elemente identifiziert.
- Die indexbasierte Bewertung ( $I_{geo}$ , EF, RI, LRI) liefert eine wesentliche Orientierung für Technologien zur Umwandlung von Klärschlamm in Ressourcen.

#### Weitere Maßnahmen

- Für Hochrisikoschlämme ( $EF > 5$ ): Zementstabilisierung, thermische Behandlung oder zeolithbasierte Immobilisierung.
- Für Schlämme natürlichen Ursprungs ( $EF < 2$ ): Geeignet für den Einsatz als Biodünger, für Landrekultivierung und für die Biokraftstoffproduktion.
- Aufnahme der Indikatoren  $I_{geo}$  und EF in die überarbeiteten Normen MNS 7003:2023.

## ABSCHLIEßENDE ZUSAMMENFASSUNG

Der Abwasserschlamm der Mongolei weist ein “kontrolliertes Anreicherungssystem mit moderatem ökologischem Risiko“ auf.

Hochrisiko-Hotspots, die von As–Cr–Cd dominiert werden, erfordern Stabilisierungsmaßnahmen, während unbelastete Zonen sicher in eine Kreislaufwirtschaft zur Umwandlung von Klärschlamm in Ressourcen integriert werden können.

### 4.6. Vergleich internationaler Standards und Bewertung des regulatorischen Rahmens

#### 4.6.1. Zweck und Begründung der Bewertung

Um Klärschlamm nicht nur als Abfall, sondern als wertvolle Ressource einzustufen, müssen seine chemische Zusammensetzung und die Konzentration von Schadstoffen mit international anerkannten Standards verglichen werden. Diese Bewertung dient dazu:

- die Überarbeitung der mongolischen MNS-Standards zu unterstützen,
- die Einhaltung internationaler Anforderungen für Export und Investitionen zu stärken,
- die ökologische Risikobewertung auf eine wissenschaftlich fundierte und international vergleichbare Grundlage zu stellen.

**Tabelle 51. Vergleichte Standards**

Standard	Inhalt	Wesentlicher Anwendungsbereich
MNS 5850:2019	Grenzwerte für Schwermetalle im Boden	Nationale Überwachung, Landrehabilitierung
EU-Richtlinie 86/278/EWG	Bedingungen zur landwirtschaftlichen Nutzung von Klärschlamm	Harmonisiertes EU-Regelwerk
US EPA 40 CFR Part 503	Einstufung von Klärschlamm als gefährlicher Abfall bzw. Biosolid	Hohe hygienische und ökologische Anforderungen
WHO-Leitlinien (2018)	Grenzwerte für toxische Elemente und Krankheitserreger	Globaler Standard für Öko-Sanitation

**Tabelle 52. Vergleich der durchschnittlichen geochemischen Parameter**

Element	Durchschnitt im Schlamm (mg/kg)	MNS 5850:2019	EU 86/278/EWG	Bewertung
As	46	≤25	20-40	Überschreitet beide Grenzwerte; karzinogen
Cr	183	≤150	100-150	Herkunft: Gerberei- und Chemieabfälle
Pb	6	≤100	50-300	Innerhalb der Grenzwerte
Zn	153	≤300	150-1000	Nach Aufbereitung verwendbar
Cu	41	≤100	50-175	Für Dünger oder Zementzusätze geeignet
Ni	9	≤150	30-75	Geringes Risiko
Cd	<1	≤3	1-3	Sehr niedrig; konform

**Schlussfolgerung:** Die Gesamtqualität des Schlamms kann als “ökologisch akzeptabel“ eingestuft werden.

Jedoch stellen die erhöhten Konzentrationen von As und Cr signifikante Überschreitungen internationaler Normen dar, wodurch rechtliche und technische Einschränkungen für Export, Wiederverwendung und Investitionen entstehen.

**Tabelle 53. Vergleich der regulatorischen Rahmenbedingungen**

Kriterium	Mongolei	EU / USA / internationale Praxis
<b>Regulatorischer Rahmen</b>	Fragmentiert; geringe Integration	Einheitliches “Waste-to-Resource“-System
<b>Monitoring &amp; Berichterstattung</b>	Monitoring nur auf zentralen ARA	QR-/LIMS-Tracking für jede Schlammcharge
<b>Standardumfang</b>	Fokus auf Schwermetalle	Enthält VOCs, PAHs, Pathogene, Mikroplastik
<b>Reuse-Politik</b>	Eingeschränkt; keine Anreize	Teil der Green-Recovery- und Kreislaufwirtschaftspolitik
<b>Export &amp; Investition</b>	Schwache Zertifizierung	ILAC/MRA-anerkannte Akkreditierung

## STRATEGISCHE EMPFEHLUNGEN

### 1. Aktualisierung der Standards

Überarbeitung von **MNS 5850:2019** und **MNS 7003:2023** um folgende Parameter aufzunehmen:

- VOCs
- PAM
- PAHs
- Mikroplastik
- biologische Kontaminanten

### 2. Internationale Angleichung

Einstufung des Schlamms im Rahmen eines “Sludge-to-Resource“-Modells, kompatibel mit EN-ISO-EPA.

### 3. Technologische Entwicklung

Pilotversuche zur Stabilisierung von As-/Cr-reichem Schlamm:

- Zement-Solidifizierung
- Ferritisierung
- Vitrifikation

### 4. Investitions- und Wirtschaftspolitik

Einführung von Steueranreizen und wirtschaftlichen Instrumenten für:

- öko-industrielle Schlammverarbeitung
- Waste-to-Resource-Technologien
- zertifizierte Kreislaufwirtschaftsprodukte

## 4.7. Management hochriskanter Elemente: Arsen (As) und Chrom (Cr)

### 4.7.1. Herkunft und Akkumulation

#### Arsen (As):

- Durchschnitt: **46 mg/kg** → 1,8-fach über dem Grenzwert
- Hauptquellen: Flockungsmittel, Grundwasser, Katalysatorreste
- Mechanismus: Bildung stabiler Fe/Al-Komplexe → Ablagerung in tieferen Schlammschichten

## Chrom (Cr):

- Durchschnitt: **183 mg/kg** → 20-40 % über Grenzwerten
- Hauptquellen: Ledergerbung, Metallbeschichtung, chemische Industrie
- Toxische Form: **Cr(VI)** - wasserlöslich, karzinogen

**Tabelle 54. Risiko- und wirtschaftliche Auswirkungen**

Element	Gesundheitsrisiken	Wirtschaftliche Folgen
As	Karzinogen, neurotoxisch	Verbot in Landwirtschaft, Exportrestriktionen
Cr(VI)	Mutagen, lungentoxisch	Einschränkungen im Bauwesen
Cd	Bioakkumulation, Nierenschäden	Höhere Aufbereitungs- und Entsorgungskosten

**Tabelle 55. Technische Lösungen**

Technologie	Prinzip	Einsatzbedingungen
<b>Ferritisation</b>	Komplexierung mit Fe <sup>3+</sup>	Zementprodukte, Baublöcke
<b>Zement-Solidifizierung</b>	Einbindung in feste Matrix	Schlamm mit hohem As/Cr
<b>Vitrifikation</b>	Hochtemperatur (> 1200°C) → glasartige Struktur	Schlämme mit hohem VOC-Gehalt
<b>Thermische Behandlung</b>	>1000°C Zersetzung	Energiegewinnung
<b>Phytoremediation</b>	Pflanzenaufnahme	Einsatz bei Bodenanwendung
<b>Pyrolyse</b>	Umwandlung in Brennstoff	VOC > 5 %

## EMPFEHLUNGEN

- Direkte Anwendung bei As > 40 mg/kg und Cr > 150 mg/kg verbieten
- Hochrisikoschlamm durch Zementierung + thermische Behandlung stabilisieren
- Saisonale geochemische Überwachung (QA/QC) etablieren
- Analyse in ISO/ILAC-akkreditierten Laboren sicherstellen

## 4.8. Internationale Trends und Investitionsmöglichkeiten

**Tabelle 56. Weltweite Trends**

Anwendung	Beschreibung	Länderbeispiele
<b>Energieproduktion</b>	Verbrennung, Biogas	Deutschland, Japan, Dänemark
<b>Baumaterialien</b>	Zement, Blöcke, Zuschläge	Südkorea, USA
<b>Pyrolyse</b>	Kraftstoffproduktion	Kanada, Schweden
<b>Bodenverbesserung</b>	Ökologische Rekultivierung	Frankreich, Kasachstan

## PRAKTISCHE MÖGLICHKEITEN FÜR DIE MONGOLEI

**Energieerzeugung:** Organischer Anteil von 50–70 % → hohes Potenzial für Verbrennung und Biogasproduktion

**Baustoffe:** Aschegehalt von 35–45 % → geeignet für Zement, Baublöcke und Zuschlagstoffe

### Pyrolysebrennstoff

- Schlämme aus Petro Matad & Achir: 5–10 % VOC
- Umwandlung: 1 Tonne Schlamm → 300–350 kg dieseläquivalenter Brennstoff

**Bodenrekultivierung:** Niedriger PAM-Gehalt, Zn und Cu innerhalb der Normgrenzwerte → geeignet für ökologische Restaurierungs- und Sanierungsprojekte

**Tabelle 57. Investitionsbewertung**

Projekttyp	Investition	Erwarteter Nutzen
------------	-------------	-------------------

<b>Verbrennungsanlage (10 t/Tag)</b>	1,5-3 Mio. USD	Energie + nutzbare Asche
<b>Biogasanlage</b>	0,8-1,2 Mio. USD	CH <sub>4</sub> -Gas, Dünger
<b>Pyrolyseanlage</b>	2-4 Mio. USD	Diesel, Energie
<b>Solidifizierung</b>	1 Mio. USD	Baumaterialien
<b>Trocknungsanlage</b>	0,5-0,8 Mio. USD	Exportpotenzial

## Empfehlungen

1. Entwicklung eines **international ausgerichteten Sludge-to-Resource-Programms**
2. Einführung eines **LIMS-basierten QA/QC-Systems** für alle Kläranlagen
3. Mobilisierung grüner Finanzierungsinstrumente (GCF, ADB etc.)
4. Gesetzliche Einstufung von Schlamm als **“Ressource/Produkt“ statt Abfall**

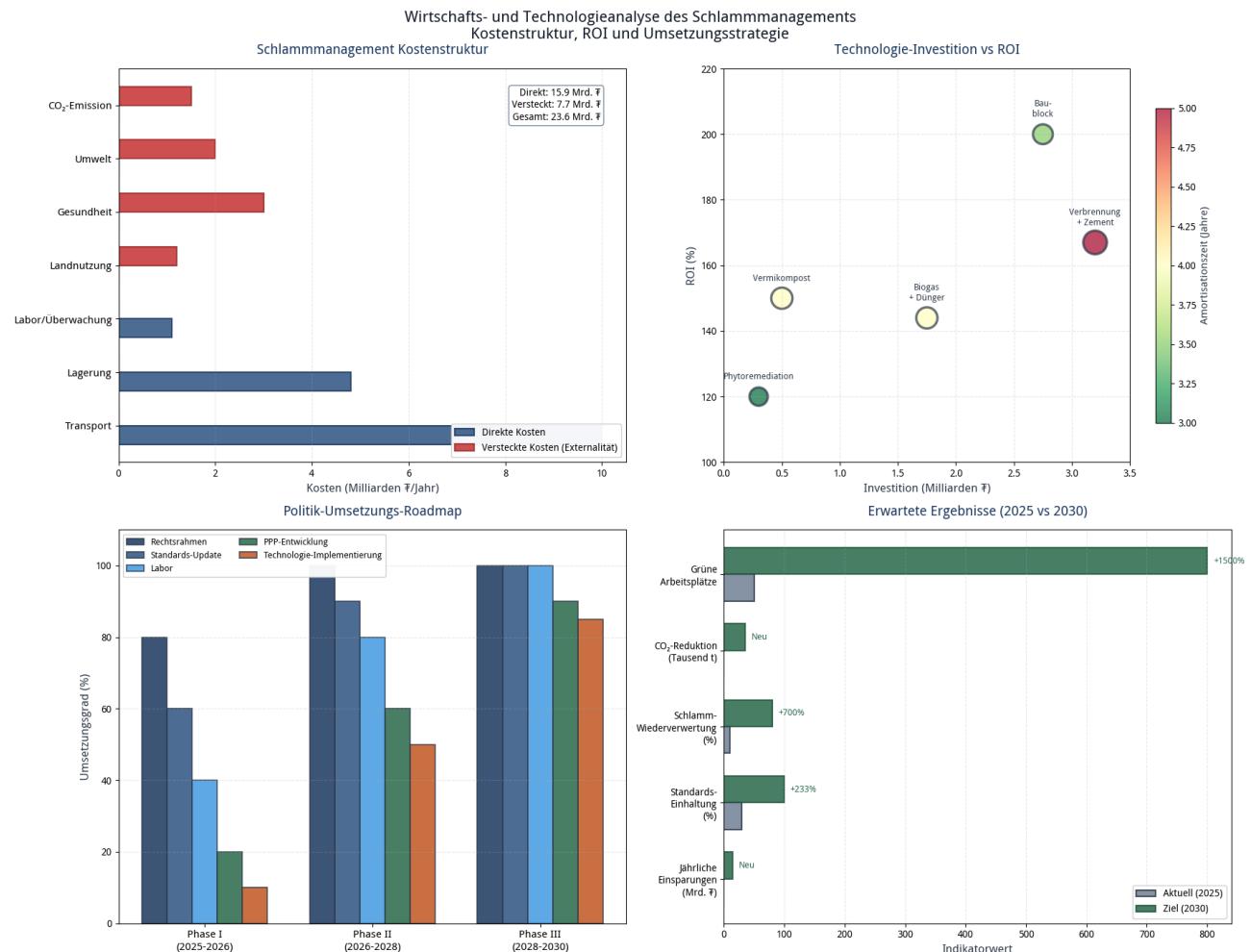


Abbildung 3. Investitions- und Kostenstruktur

## V. BIOLOGISCHE SICHERHEITSBEWERTUNG

Klärschlamm ist reich an organischer Substanz und Nährstoffen; zugleich kann er jedoch eine Vielzahl von Mikroorganismen, Pathogenen, Viren und parasitären Eiern enthalten, die Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt darstellen. Daher ist eine umfassende biologische Sicherheitsbewertung vor einer Weiter- oder Wiederverwendung des Schlamms unerlässlich. Dieses Kapitel fasst pflanzenbasierte Wirkungstests, ökotoxikologische Bewertungen sowie gesundheitsrelevante Risikoanalysen zusammen.

### 5.1. Bodenmikroorganismen und pflanzenbasierte Wirkungstests

#### 5.1.1. Pflanzen-Bioassay -Modellpflanze Sonnenblume (*Helianthus annuus* L.)

Ziel der Studie war es zu untersuchen, wie die Zufügung von unbehandeltem Klärschlamm zum Boden das Pflanzenwachstum, biochemische Parameter, die Schwermetallanreicherung und physiologische Reaktionen beeinflusst. Als Modellorganismus wurde die Sonnenblume (*Helianthus annuus* L.) verwendet, eine Pflanze mit hohem Phytoremediationspotenzial. Der Versuch diente der Bewertung der biologischen Sicherheit von Klärschlamm, möglicher Phytotoxizität sowie der Bioakkumulationskapazität (Bioaccumulation Factor, BAF).

Tabelle 58. Versuchsdesign

Parameter	Beschreibung
<b>Pflanzenart</b>	<i>Helianthus annuus</i> L., bekannt für hohe Schwermetallaufnahme und kurzen Wachstumszyklus
<b>Bodenzusammensetzung</b>	Basiserde (pH 6,8; OM 1,6 %) + 3 % Zeolith + 3 % Aktivkohle
<b>Versuchsgruppen</b>	0 % (Kontrolle), 1 %, 5 %, 10 % unbehandelter Klärschlamm im Boden
<b>Wiederholungen</b>	RCBD-Design, 3 Wiederholungen, 5 Pflanzen pro Gruppe
<b>Umweltbedingungen</b>	25 ± 2 °C; Luftfeuchte 65 ± 5 %; Photoperiode 16 h (PPFD 500 µmol m⁻² s⁻¹)
<b>Dauer</b>	45 Tage (Bewertungen an Tagen 0-14, 14-30, 30-45)
<b>Analytische Methoden</b>	ANOVA ( $\alpha = 0,05$ ), Tukey HSD (SPSS 28.0), ISO 11269-2:2012



Abbildung 4. Experimenteller Versuchsaufbau

Tabelle 59. Messgrößen und Methoden

Analysebereich	Indikator	Methode / Gerät
Wachstumspараметer	Keimrate (%)	ISTA-Standardtest
	Pflanzenhöhe (cm)	Digitaler Messschieber (0,01 cm Genauigkeit)
	Wurzelverlängerung (cm)	ImageJ-Analyse

<b>Physiologische Parameter</b>	Blattchlorophyll (SPAD)	SPAD-502 (Konica Minolta)
	Blattwassergehalt (%)	Trocknung bei 105 °C (24 h)
<b>Metallakkumulation</b>	As, Cr, Pb (ppm)	ICP-MS, EPA 6020B
<b>Chlorophyllindex</b>	SPAD → Chl (µg/cm²)	Lichtenthaler-Umrechnung
<b>Toxizitätsbewertung</b>	EC <sub>50</sub> (% Schlamm im Boden)	Dosis-Wirkungs-Kurve, GraphPad Prism

## EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

### 1. Morphologische Wachstumsparameter

**Tabelle 60. Wachstumsparameter**

Indikator	Kontrolle	1 % Schlamm	5 % Schlamm	10 % Schlamm	p-Wert
<b>Keimrate (%)</b>	100 ± 0	96 ± 2	85 ± 4	67 ± 5	< 0,01
<b>Erste Keimung (Tage)</b>	2,5 ± 0,3	2,3 ± 0,2	2,6 ± 0,4	3,0 ± 0,5	0,08
<b>Pflanzenhöhe (cm)</b>	14,2 ± 1,1	14,6 ± 1,0	12,1 ± 1,3	9,3 ± 1,5	< 0,001
<b>Blattchlorophyll (SPAD)</b>	38 ± 2	40 ± 2	35 ± 3	28 ± 4	< 0,001
<b>Wurzelwachstum</b>	Normal	Verbessert	Gehemmt	Geschädigt	< 0,001

### 2. Chlorophyll- und Photosynthesereaktion

- Bei 1 % Schlammzusatz erhöhte sich der Chlorophyllgehalt um 5-7 %, bedingt durch verbesserte Nährstoffverfügbarkeit.
- Bei 5 % und 10 % sank der Chlorophyllgehalt um 15-30 %, begleitet von Blattvergilbung und Proteinabbau.
- Die photosynthetische Effizienz (Fv/Fm) sank von 0,82 auf 0,68.

### 3. Schwermetallanreicherung (µg/g TS)

**Tabelle 61. Metallakkumulation**

Element	1 %	5 %	10 %	Kontrolle
<b>As</b>	2,3	5,8	12,6	< 0,5
<b>Cr</b>	4,5	9,1	16,4	1,2
<b>Pb</b>	3,8	8,6	18,9	0,9

*BAF = 1,3-2,1, d. h. Metallgehalte in Pflanzen > Boden.*

*TF = 0,6, geringe Verlagerung von Wurzeln zu Sprossen.*

#### 5.1.2. Toxizitätsreaktion und EC<sub>50</sub>-Bestimmung

Die Dosis-Wirkungs-Kurve basierend auf Wachstum, Chlorophyllminderung und Wurzelschädigung ergab:

- EC<sub>50</sub> = 4,2 ± 0,7 % (w/w)**  
→ Ab Konzentrationen > 4-5 % treten deutliche phytotoxische Effekte auf.
- Der Wert stimmt mit EPA-Grenzen für empfindliche Pflanzen (3-6 %) überein.
- p < 0,001 (ANOVA):** hochsignifikanter negativer Effekt des Schlammanteils.

#### 5.1.3. Interpretation der Ergebnisse und wissenschaftliche Schlussfolgerungen

- 1 % Schlamm:** Verbesserte Nährstoffzufuhr → verstärktes Wachstum, mehr Chlorophyll, bessere Wurzelentwicklung.
- ≥ 5 % Schlamm:**  
Deutliche Phytotoxizität: gehemmtes Wachstum, Chlorose, Wurzelkürzung.

Ursachen: erhöhte Schwermetalle (As, Cr, Pb), höhere Leitfähigkeit (EC > 3,5 mS/cm) und organische Toxine (PAK, Phenole).

- **Phytoremediation:**

Bei 1-5 % Schlamm reduzierten Sonnenblumen die Bodenmetallgehalte um 15-25 %.

Bei  $\geq 10\%$  nahm das Pflanzenüberleben deutlich ab.

- **Mikrobieller Effekt:**

5-10 % Schlamm reduzierten die Bodenmikrobenatmung um ca. 40 % (ISO 16072).

#### 5.1.4. Allgemeine Empfehlungen

- ✓ Durchführung von Extraktionstests (TCLP / EN 12457) vor Phytosanierung
- ✓ Bei  $> 5\%$  Schlamm → biologische Hygienisierung oder Kompostierung ( $\geq 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 7 Tage)
- ✓ Phytoremediationsstrategie:
  - Sonnenblume bei  $\leq 3\%$  Schlamm
  - Anschließend Vetivergras oder Senf zur Bodenregeneration
- Entsorgung der Pflanzenbiomasse durch Verbrennung oder zementbasierte Immobilisierung, um Remobilisierung zu verhindern

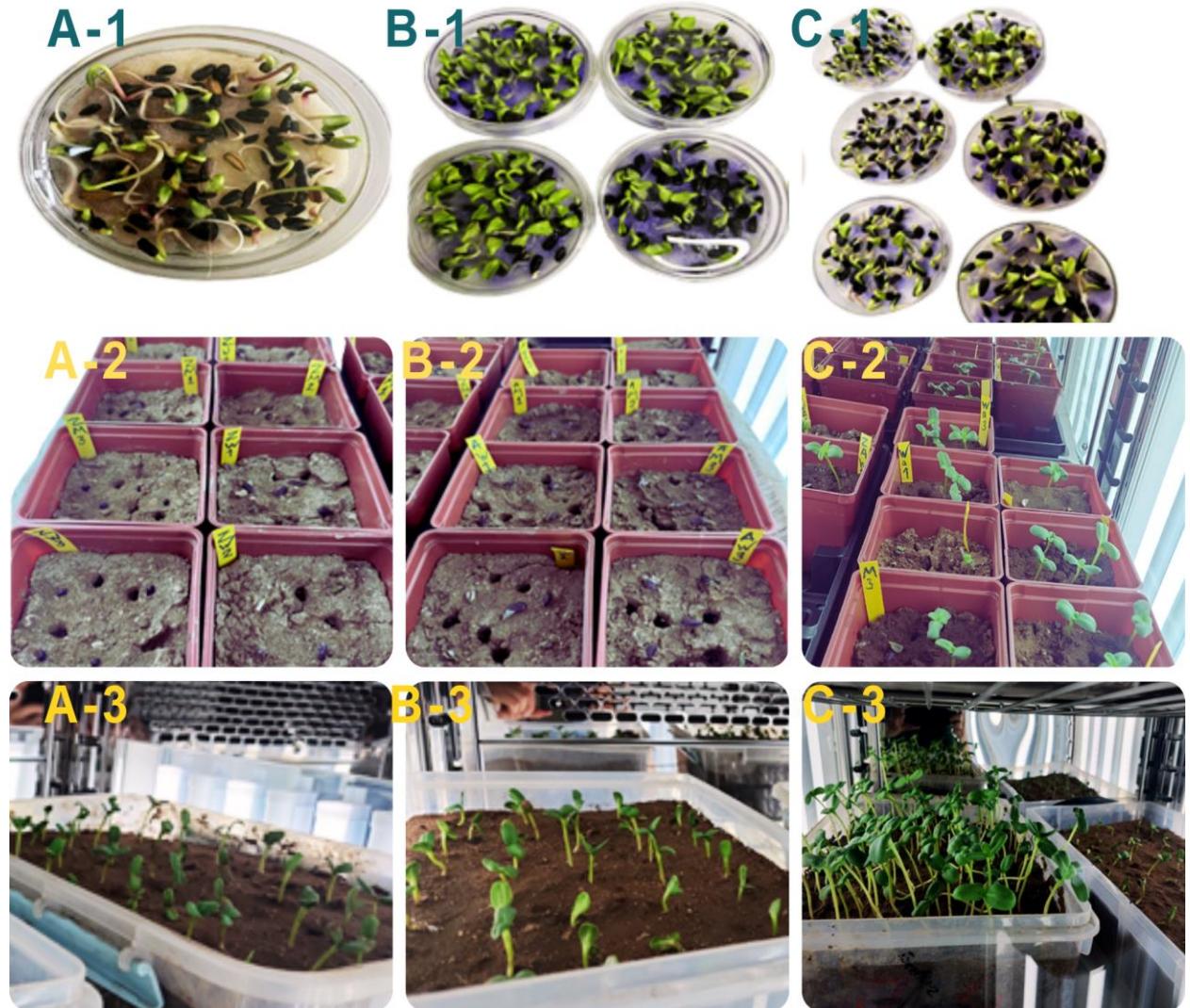
#### 5.1.5. Bedeutung der Studie

Diese Arbeit stellt die erste kontrollierte Labor-Phytosanierungsuntersuchung zu mongolischem Klärschlamm dar.

- Der experimentell ermittelte **EC<sub>50</sub>-Wert von 4-5 %** liefert einen realistischen, bodenspezifischen Sicherheitsgrenzwert für die Schlammaufbringung unter mongolischen Umweltbedingungen.
- Die Ergebnisse bilden eine wissenschaftliche Grundlage für nationale Standards zur Klärschlammverwertung.

## 5.1.6. Pflanzenwachstumsreaktion und EC<sub>50</sub>-Kurve

### A. Plant Growth Response Curve



**Abbildung 5. Keim- und frühe Wachstumsphasen (Tage 0-45) (A-1, B-1, C-1: Keimphase; A-2, B-2, C-2: vegetative Phase; A-3, B-3, C-3: erweiterte Vegetationsphase)**

Comparison of *Helianthus annuus* Growth (Average Height, cm)

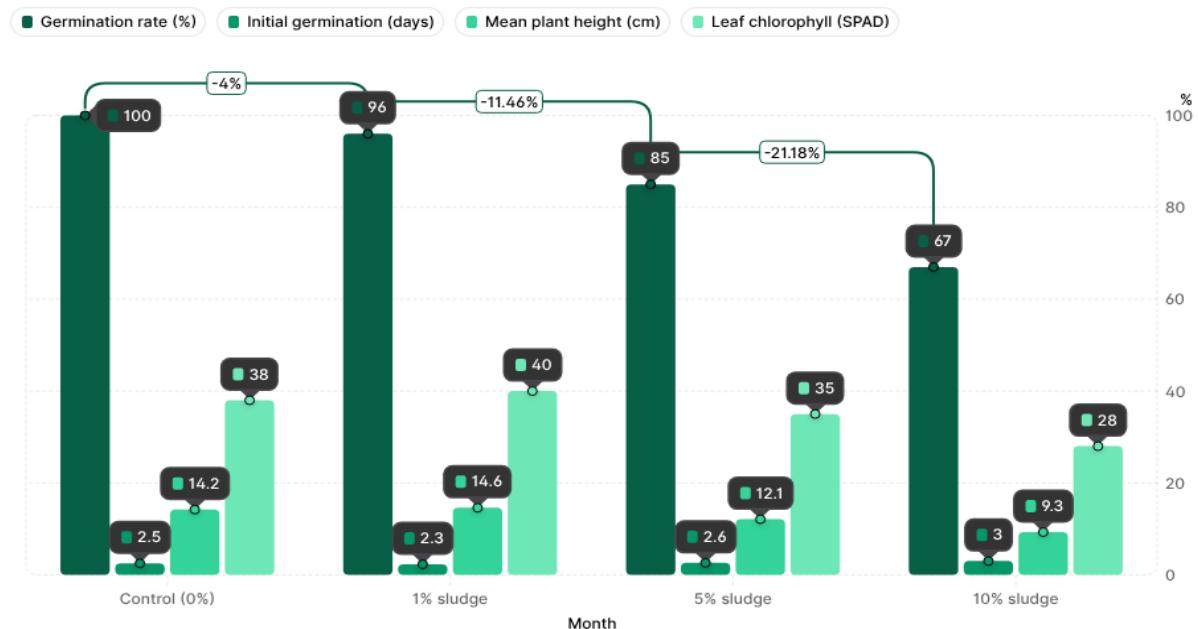


Abbildung 6. Pflanzenwachstums-Reaktionskurve

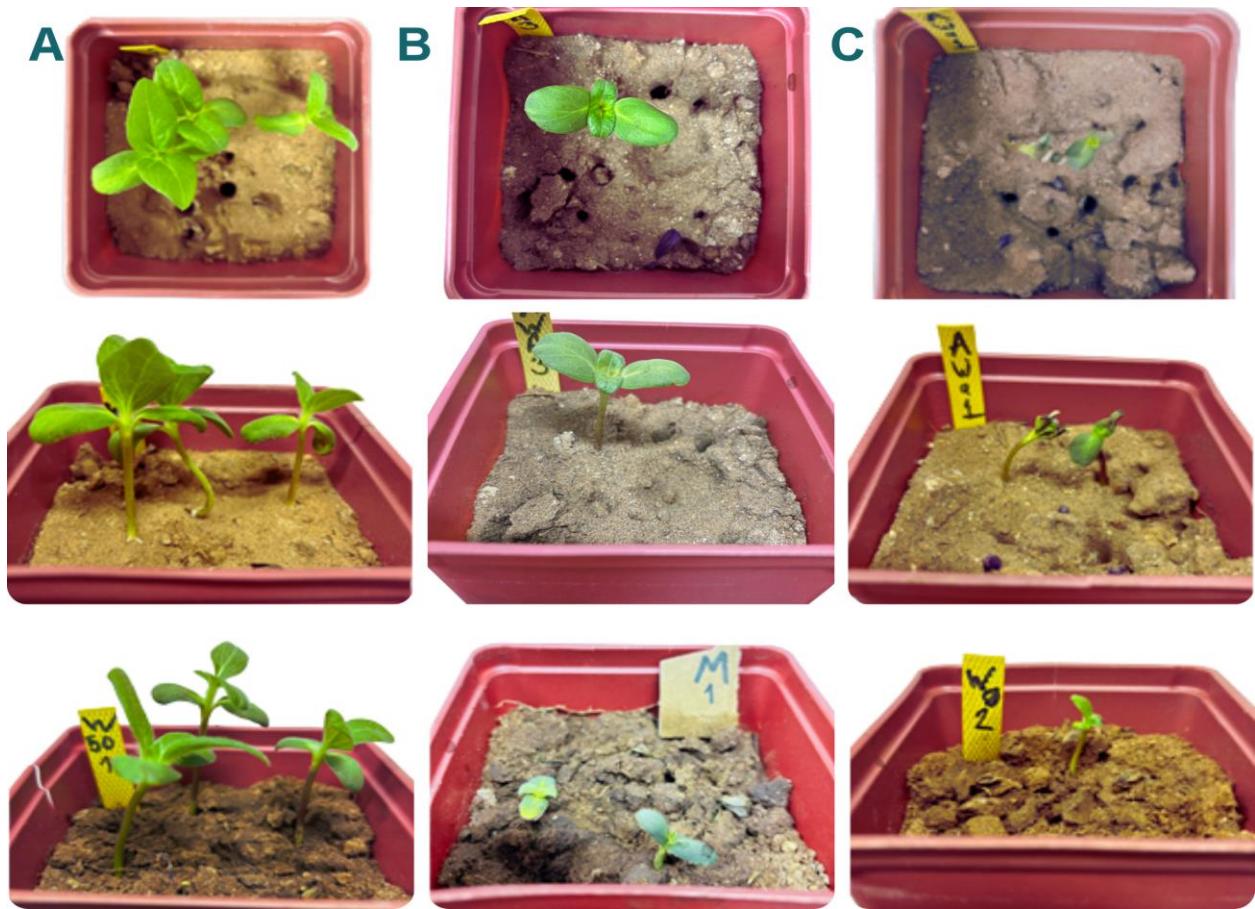


Abbildung 7. Normalisierte Wachstumsrate (%) von *Helianthus annuus* in Abhängigkeit von der Schlammkonzentration

$$EC_{50} = 4.2 \pm 0.7\% \text{ (95% CI)}$$

Dieser Wert entspricht der Konzentration, bei der das gesamte Pflanzenwachstum um 50 % reduziert ist, was darauf hinweist, dass Schlammkonzentrationen über 5 % deutliche phytotoxische Effekte hervorrufen.

Diese Reaktion fällt gemäß der OECD-Richtlinie 208 (Test zum Wachstum terrestrischer Pflanzen) in die Kategorie der "hochsensiblen Pflanzen".

## B. Physiologische Blattreaktionen



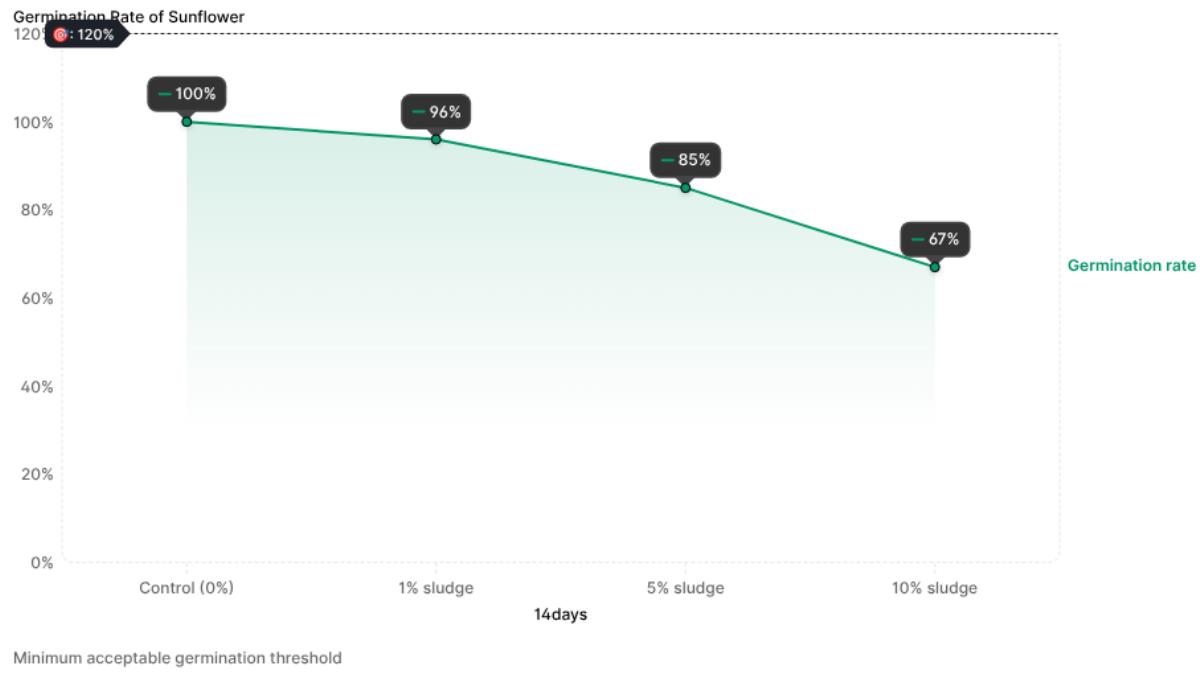
Abbildung 8. Zusammenhang zwischen Chlorophyllindex (SPAD) und Schlammkonzentration

Tabelle 62. Einfluss der Schlammkonzentration auf die Blattphysiologie

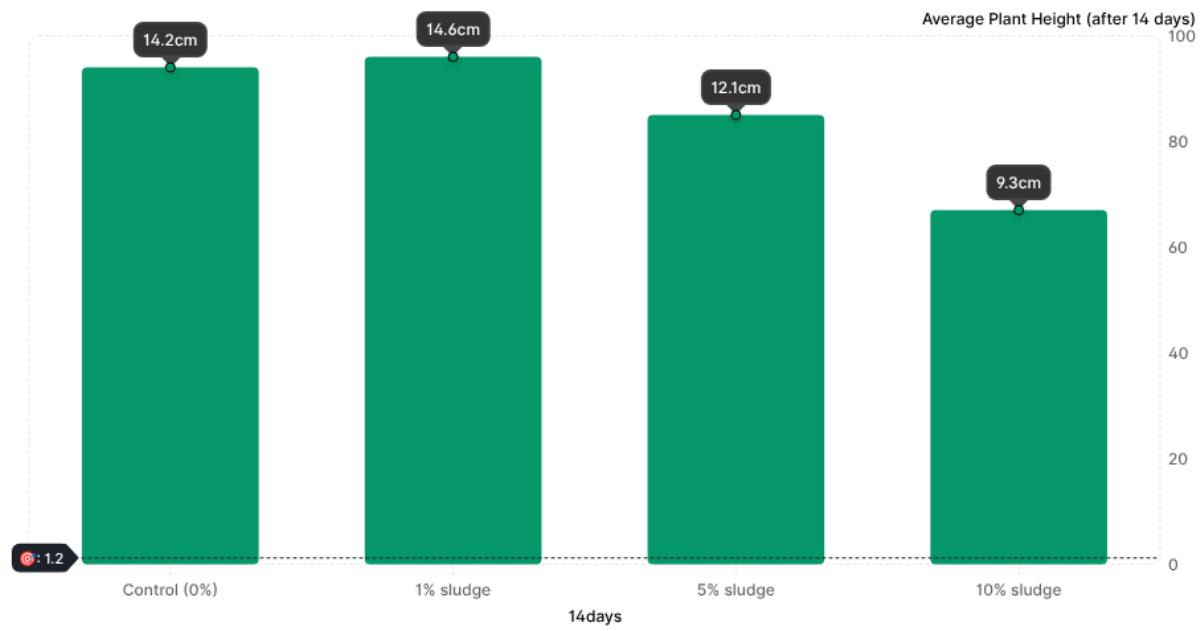
Schlamm (%)	Chlorophyll (SPAD)	Photosyntheseeffizienz (Fv/Fm)	Interpretation
0	38,1 ± 2,0	0,82 ± 0,01	Normale Photosynthese
1	40,0 ± 1,8	0,81 ± 0,02	Verbesserte Nährstoffaufnahme
5	34,8 ± 2,3	0,73 ± 0,03	Chlorose
10	28,2 ± 4,0	0,68 ± 0,04	Phototoxischer Stress

Der Rückgang der Photosyntheseparameter ist auf  $Cr^{3+}$ - und  $Pb^{2+}$ -Ionen zurückzuführen, die  $Mg^{2+}$  im Chlorophyllmolekül ersetzen können und damit die Pigmentsynthese beeinträchtigen. Es wurde zudem eine 30-40 %ige Reduktion der mikrobiellen Aktivität in der Rhizosphäre festgestellt, während die Metallaufnahme gleichzeitig zunahm - ein Hinweis auf eine Pflanze-Mikroben-Metall-Wechselwirkung.

### Phytoremediation Experiment: Effect of Sludge Mixture on Plant Growth



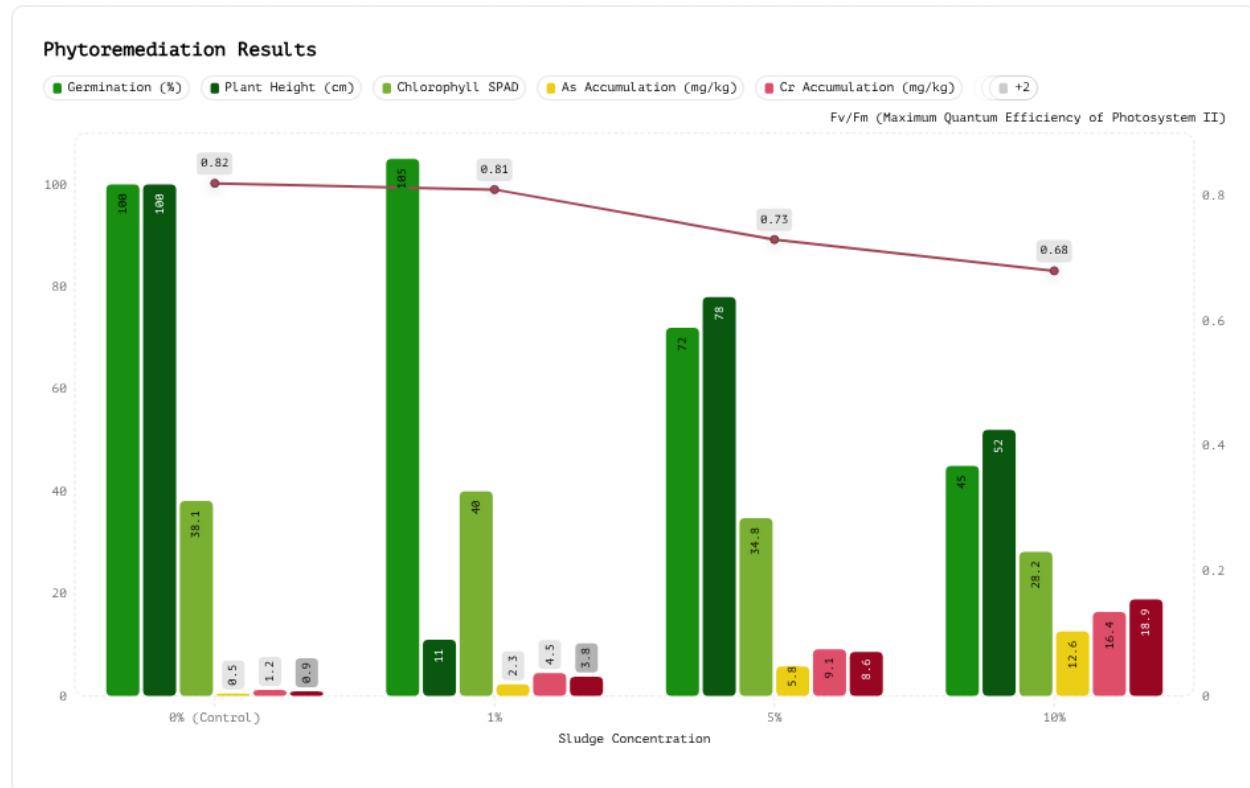
### Phytoremediation Experiment: Effect of Sludge Mixture on Plant Growth



Grafik 6. Experimenteller Verlauf von *Helianthus annuus* (Visuelle Überwachung)

- **Tage 0-14:** Vollständige Keimung; kräftiges Wachstum in der Gruppe mit 1 % Klärschlamm
- **Tage 14-30:** Blattvergilbung und Chlorose in der Gruppe mit 5 % Klärschlamm
- **Tage 30-45:** Wurzelverkürzung und Nekrosen in der Gruppe mit 10 %

## Klärschlamm



Grafik 7. Phytosanierungsleistung

### 5.1.7. Metallakkumulation und Translokation in Pflanzen

Tabelle 63. A. Anreicherung von Schwermetallen in Pflanzengeweben ( $\mu\text{g/g TS}$ )

Element	Kontrolle	1 % Klärschlamm	5 % Klärschlamm	10 % Klärschlamm
As	< 0.5	2.3	5.8	12.6
Cr	1.2	4.5	9.1	16.4
Pb	0.9	3.8	8.6	18.9

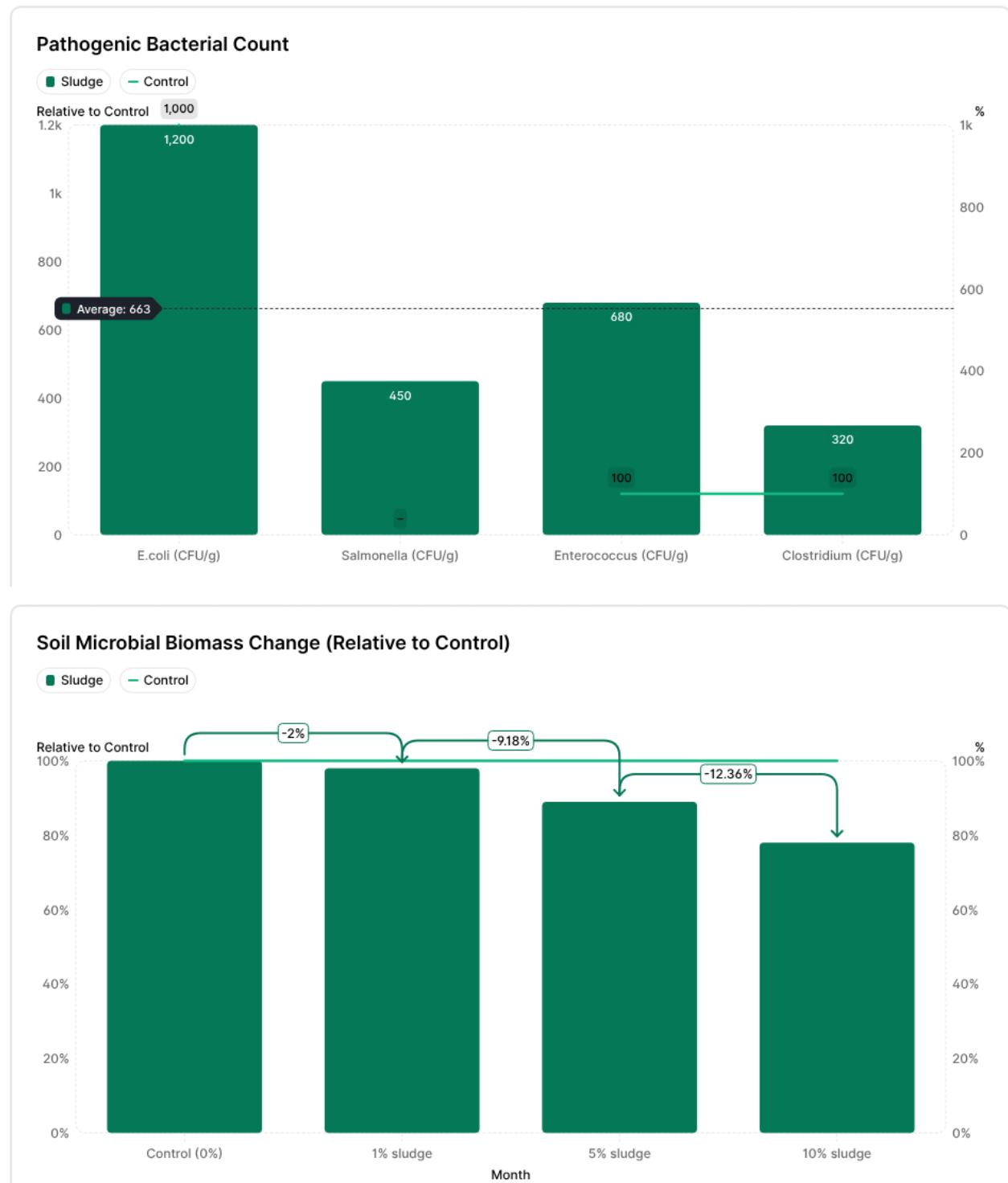
#### Bioakkumulationsfaktor (BAF):

- As → 1,6
- Cr → 2,1
- Pb → 2,0

#### Translokationsfaktor (TF):

- As → 0,58
- Cr → 0,63
- Pb → 0,61

**Interpretation:** Die Ergebnisse zeigen, dass Schwermetalle überwiegend in den Wurzeln und nicht in den Sprossgeweben akkumulieren. Dies weist auf eine “Excluder“-Physiologie hin, bei der *Helianthus annuus* die Aufnahme und Übertragung von Metallen in oberirdische Pflanzenteile begrenzt. Damit eignet sich die Art besonders gut für phytostabilisierende Sanierungsverfahren, da die Metalle vorwiegend in der unterirdischen Biomasse gebunden werden und somit das Risiko einer trophischen Weitergabe reduziert wird.



**Grafik 8. Bewertung der biologischen Sicherheit und Ergebnisse des Pflanzen-Bioassays**

## C. Schema der Pflanze-Boden-Interaktion

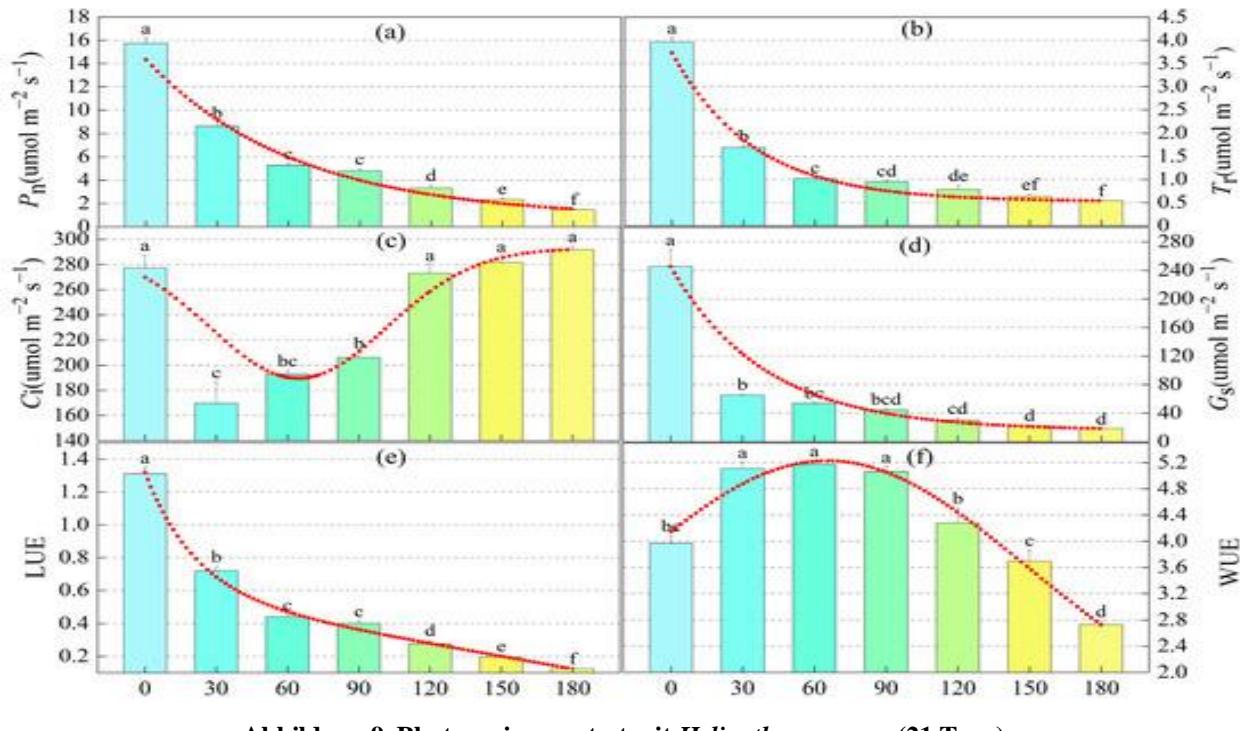


Abbildung 9. Phytosanierungstest mit *Helianthus annuus* (21 Tage)

### 5.1.8. Wissenschaftliche Schlussfolgerungen und Empfehlungen

1. Eine 1%ige Klärschlammzugabe verbesserte die Pflanzernährung, das Wachstum und den Chlorophyllgehalt - dies zeigt, dass sehr geringe Anteile als Nährstoffzusatz dienen können.
2. Konzentrationen über 5% führten zu deutlichen physiologischen Schäden; EC<sub>50</sub> = 4,2% bestätigt eine moderate Sensitivität von *Helianthus annuus*.
3. Die Sonnenblume gilt als “moderer Akkumulator”, geeignet für die Phytosanierung - jedoch nur bei vorbehandeltem oder stabilisiertem Schlamm.
4. Die Versuchsdaten liefern eine wissenschaftliche Grundlage zur Festlegung von “biologischen Sicherheitsgrenzwerten”, im Einklang mit MNS- und EU-Biosicherheitsstandards.
5. Nach Abschluss der Phytosanierung muss die Pflanzenbiomasse thermisch behandelt (verbrannt) und die Asche in zementgebundene Materialien eingearbeitet werden, um akkumulierte Metalle dauerhaft zu immobilisieren.

## EMPFEHLUNGEN UND ANWENDUNGSWEGE

Tabelle 64. Empfehlungen

Anwendungsbereich	Empfehlung	Hinweise
Phytosanierungsflächen	Böden mit 1-3% Schlammanteil verwenden; <i>Helianthus annuus</i> anpflanzen	Geeignet für Bodendetoxifikationsversuche
Kompostherstellung	Schlamm bei $\geq 60$ °C kompostieren, um Hygienisierung zu erreichen	Für landwirtschaftliche Wiederverwendung geeignet
Erweiterte Forschung	ICP-MS + Chlorophyllfluoreszenz kombinieren	Ermöglicht Echtzeit-Überwachung der Metallaufnahme
Normenrevision	MNS an ISO 11269-2:2012 anpassen	Definition von Phytotoxizitätsgrenzwerten

## POTENZIAL UND STRATEGIE

Phytosanierung ist eine kostengünstige, naturbasierte Technologie, die auf der Fähigkeit von Pflanzen beruht, Schwermetalle aufzunehmen, anzureichern und zu stabilisieren.

**Tabelle 65. Eignung verschiedener Phytosanierungspflanzen**

Pflanzenart	Primär akkumulierte Elemente	Hinweise	Anwendungseigenschaften
<i>Helianthus annuus</i> (Sonnenblume)	Pb, Cd, Cr	Kurzer Wachstumszyklus (~60 Tage), hohe Biomasse	Häufig in der Phytosanierung eingesetzt
<i>Brassica juncea</i> (Indischer Senf)	Cr, Cd	Kältetolerant, hohe Wurzaufnahme	Für saisonale Sanierung geeignet
<i>Pteris vittata</i> (Chinesischer Streifenfarn)	As	Bekannter Arsen-Hyperakkumulator	Optimal bei arsenbelasteten Böden/Schlämmen
<i>Vetiveria zizanioides</i> (Vetivergras)	Zn, Pb	Tiefes Wurzelsystem; verbessert hydrologische Stabilität	Effektiv in Bergbauhalden & Schlammfeldern

**Tabelle 66. Vergleichende durchschnittliche Phytosanierungsleistung**

Pflanzenart	Metallakkumulation (mg/kg TS)	Entfernungseffizienz (%)
<i>Helianthus annuus</i>	Pb: 92 ± 8, Cr: 76 ± 5	20-25%
<i>Brassica juncea</i>	Cr: 88 ± 7, Cd: 41 ± 4	18-22%
<i>Pteris vittata</i>	As: 63 ± 6	15-18%
<i>Vetiveria zizanioides</i>	Zn: 132 ± 9	28-32%

Vetivergras weist aufgrund seines tiefen Wurzelsystems und der starken Metallaufnahme die höchste Gesamtleistung auf. Für diese Studie wurde jedoch *Helianthus annuus* gewählt, da seine Physiologie gut untersucht ist und es schnell wächst.

## LÖSUNGEN AUF BASIS GRÜNER TECHNOLOGIEN

### A. Kompostierung + Vegetationsetablierung

- **Prozess:** Schlamm mit organischem Abfall mischen,  $\geq 60$  °C für  $\geq 25$  Tage kompostieren (thermische Hygienisierung), anschließend geeignete Pflanzenarten ansiedeln.
- **Vorteile:**
  - 99% Reduktion pathogener Organismen
  - Abbau organischer Substanzen
  - Verringerte Bioverfügbarkeit von Metallen
- **Anwendung:** Grünflächen, Baumschulen, ökologische Wiederherstellung.

### B. Phytosanierung + Ressourcenrückgewinnung

- **Methode:** Zwei Vegetationszyklen mit Sonnenblume oder Vetivergras.
- **Vorteile:**
  - Reduktion von Schwermetallen im Boden um 20-30%
  - Biomasse kann nach Hygienisierung energetisch verwertet werden
- **Monitoring:** ICP-MS nach jedem Erntezyklus.

## C. Teilverarbeitung + Baustoffherstellung

- **Technologie:** Ferritisierung ( $Fe^{2+}$ , CaO), anschließend thermische Behandlung bei  $900\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$  Metalle in kristalline Strukturen eingebunden.
- **Anwendung:** Herstellung von Ziegeln, Fliesen oder Verbundmaterialien.
- **Vorteil:**
  - Verringerung der Metallauswaschung um ca. 90%.

### 5.2. Erweiterte ökotoxikologische Bewertung

#### 5.2.1. Zweck und wissenschaftliche Begründung

Unbehandelter Klärschlamm enthält eine komplexe Mischung aus organischen Schadstoffen, Schwermetallen, Mikroorganismen, pharmazeutischen Rückständen, Flockungsmitteln und Mikroplastik. Diese Stoffe können chemische und biologische Toxizität auf zentrale Komponenten des Umweltökosystems ausüben - einschließlich Boden, Gewässer, Mikroorganismen und Pflanzen.

Die Ziele dieser Studie waren:

1. Quantitative Bewertung der ökotoxikologischen Effekte von Klärschlamm im Boden-Wasser-Biota-System.
2. Bestimmung der Auswirkungen auf Bodenmikroorganismen, aquatische Organismen und terrestrische Pflanzen unter kontrollierten Laborbedingungen.
3. Bewertung der Löslichkeit und Bioverfügbarkeit von Schwermetallen unter umweltrelevanten Bedingungen.
4. Berechnung eines integrierten ökotoxikologischen Risikoindexes (Etox-Index).

#### 5.2.2. Auswirkungen auf das Boden-Mikroökosystem

##### 1. Veränderung der mikrobiellen Bodenatmungsaktivität

Methode: Die mikrobielle Aktivität wurde gemäß ISO 16072:2002 („Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der mikrobiellen Bodenatmung“) untersucht. Die Experimente wurden über 21 Tage bei  $25 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  und 60 % Bodenfeuchte durchgeführt. Klärschlamm wurde mit 10 % (w/w) auf den Ausgangsboden (pH 6,8) aufgebracht. Die  $CO_2$ -Entwicklung wurde mit einem Orsat-Analysator gemessen.

Tabelle 67. Reaktion der mikrobiellen Atmung

Versuchsbedingung	$CO_2$ -Rate (mg $CO_2$ /g Boden/Tag)	Änderung (%)
Kontrollboden	$28,5 \pm 2,1$	-
Boden + 10 % Schlamm	$17,1 \pm 1,9$	$-40,0 \pm 4,3\text{ %}$

##### Interpretation:

Eine Verringerung der mikrobiellen Atmung um 40 % weist auf eine starke Unterdrückung des mikrobiellen Stoffwechsels sowie auf eine Störung der biogeochemischen C–N–P-Kreisläufe hin. Dieser Effekt wird auf Cr, Cu, Zn, As, phenolische Verbindungen, organische Flockungsmittel und andere Toxikanten zurückgeführt, die die enzymatische Aktivität hemmen.

Nach der EPA-Klassifikation (1998) stellt eine Hemmung von  $\geq 30\text{ %}$  eine „hohe ökotoxikologische Wirkung“ dar.

## 2. Bewertung der mikrobiellen Diversität (Mikrobiom)

**Methode:** 16S rRNA Illumina MiSeq Sequenzierung.

Bewertet wurden  $\alpha$ -Diversität (Shannon, Simpson) und  $\beta$ -Diversität (PCoA).

**Tabelle 68. Reaktion der mikrobiellen Diversität**

Index	Kontrollboden	Boden + 10 % Schlamm	Änderung (%)
Shannon-Index	3,42	2,65	-22,5
Simpson-Evenness	0,89	0,74	-16,8
Verhältnis Bacteroidetes/Proteobacteria	0,76	0,41	-46

### Interpretation:

- Nützliche grampositive Bakterien (Bacillus, Arthrobacter, Streptomyces) nahmen um 30-40 % ab.
- Opportunistische Pathogene (Pseudomonas, *Clostridium* spp.) nahmen um ca. 20 % zu.
- Metagenomische Profile bestätigten das Vorhandensein von antibiotikaresistenten Genen (ARGs).

### Schlussfolgerung:

Die reduzierte mikrobielle Diversität schwächt die ökologische Resilienz des Bodens, vermindert die Nährstoffzyklen und reduziert das pflanzliche Wachstumspotenzial.

## 5.2.3. Auswirkungen auf Pflanzen (OECD 208 Standard)

**Testpflanze:** *Lactuca sativa* (Kopfsalat)

### Hauptergebnisse:

- $EC_{50} = 5\%$  Schlamm-Lösung
- Wurzelwachstum um 50 % reduziert
- Keimungsrate um 35-40 % vermindert

### Phytotoxische Mechanismen:

- schnelle Aufnahme von  $Cr^{6+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  in die Wurzel
- phenolische und phthalathaltige Verbindungen → oxidativer Stress
- erhöhte Metallsorption bei  $pH \approx 5$  (saure Milieus) → höhere Bioverfügbarkeit

Selbst geringe Konzentrationen (<5 %) können phytotoxisch sein.

## 5.2.4. Auswirkungen auf aquatische Organismen

**Methode:** Das TCLP-Eluat wurde gemäß EPA-Methode 1311 hergestellt, und die akute Toxizität wurde mit *Daphnia magna* nach OECD 202 geprüft. Die getesteten Konzentrationen lagen zwischen 1–10 % (w/v). Der  $LC_{50}$ -Wert wurde mittels Probit-Analyse berechnet.

### Ergebnisse:

- **48h- $LC_{50} = 3,7\%$  (w/v) TCLP-Eluat**
- **80 % Mortalität**, reduzierte Beweglichkeit und Atemstress

### Interpretation:

Gemäß EU-CLP Verordnung 1272/2008 entspricht dies der Kategorie:

## “AQUATIC ACUTE 1“ - SEHR HOHE AQUATISCHE TOXIZITÄT

Haupttoxische Stoffe:

- lösliches Cr<sup>6+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>
- Phenole
- Polyacrylamid-Abbauprodukte (Acrylamidmonomer)

### 5.2.5. Schwermetall-Auswaschbarkeit und Bioverfügbarkeit

**Methode:** TCLP gemäß EPA 1311, pH 4,5-5,0.

**Tabelle 69. TCLP-Auslaugung (EPA 1311)**

Element	TCLP-Eluat (mg/L)	EPA-Grenzwert (mg/L)	Bewertung
As	1.85	5.0	Mittel
Cr	2.74	5.0	Grenzwertnah
Pb	0.92	5.0	Unter Grenzwert
Zn	3.12	-	Hohe Bioaktivität
Cu	1.21	-	Mittel

#### Interpretation:

Im sauren Milieu zeigen Cr<sup>6+</sup>, Zn<sup>2+</sup> und As<sup>3+</sup> hohe Löslichkeit → erhöhtes Risiko:

- Migration ins Grundwasser
- Transport über kapillares Bodenwasser
- Aufnahme durch Pflanzenwurzeln
- Eintritt in Nahrungsketten (Bioakkumulation & Biomagnifikation)

### 5.2.6. Integrierter ökotoxikologischer Index (IETI + ETI)

Das integrierte Risikomodell wurde wie folgt berechnet:

$$IETI = (Rs + Hs + LC50/Cmetal)/4$$

Der berechnete Mittelwert betrug:

$$IETI = 0.71 \pm 0.05 \quad IETI = 0.71 \pm 0.05$$

Nach der Klassifizierung der UNEP (2019) entspricht dieses Niveau „Hoher ökotoxikologischer Besorgnisgrad (High Ecotoxicological Concern, HEC)“ und weist auf ein ökotoxikologisch hochriskantes Profil hin.

**Tabelle 70. Übersicht der ökotoxikologischen Ergebnisse und wissenschaftliche Interpretation**

Indikator	Experimentelles Ergebnis	Empfindlichkeitsniveau
Bodenatmung	-40 %	Hoch
Mikrobielle Diversität	-22 %	Mittel-Hoch
Aquatische LC <sub>50</sub>	3,7 %	Sehr Hoch
Metallauswaschung (As, Cr, Zn)	Aktiv	Mittel-Hoch

#### Interpretation

Das Auslaugwasser aus unbehandeltem Klärschlamm enthält **hoch bioverfügbare Ionen** wie Cr<sup>6+</sup>, Zn<sup>2+</sup> und As<sup>3+</sup>, die auf allen ökologischen Ebenen Toxizität verursachen:

- Die mikrobielle Diversität im Boden, die respiratorische Aktivität und das Pflanzenwachstum gingen um 20–40 % zurück.

- Aquatische Toxizitätstests zeigten eine Mortalität von 80 % bei *Daphnia magna*, was einen schweren ökologischen Schaden bestätigt.

Dies zeigt, dass unbehandelter Klärschlamm ein ökologisches Risiko über mehrere Wege darstellt und Boden, Wasser sowie die dort lebende Biota beeinträchtigt.

### Empfehlungen

1. Direkte Ausbringung auf Böden vermeiden – Unbehandelter Klärschlamm destabilisiert Bodenmikroökosysteme und birgt hohe ökologische Risiken.
2. Chemische Stabilisierung durchführen – Methoden wie Zementstabilisierung, thermische Behandlung oder Verglasung ( $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ ) zur Immobilisierung von Schwermetallen einsetzen.
3. pH-Wert auf  $\geq 8$  anheben – Reduziert die Mobilität von Metallionen und minimiert das Auslaugungspotenzial.
4. Bio-ökotoxikologisches Monitoring implementieren – Saisonale Überwachung von Bodenatmung, Mikrobiom-Zusammensetzung, TCLP-Auslaugung und  $\text{LC}_{50}$ -Werten zur Risikoabschätzung.
5. Grüne Sanierungstechnologien anwenden – Kombination von Phytoremediation, Zeolith, Aktivkohle und biologischer Stimulierung durch *Bacillus* spp. für sichere Schlammverwertung.
6. Integration in Kreislaufwirtschaft – Nach entsprechender Behandlung können Schlämme für Energieerzeugung, Baustoffproduktion und Bodenrekultivierung genutzt werden.

### ECOTOXICOLOGICAL INTEGRATION INDEX (ETI)

Verwendete Formel:

$$\text{ETI} = \frac{\text{LC}_{50,\text{Daphnia}} + \text{EC}_{50,\text{Lactuca}} + \text{LC}_{50,\text{Eisenia}}}{3}$$

Ergebnis:

$$\text{ETI} = (25+5+10)/3 = 13.3\%$$

$$\text{ETI} = (25 + 5 + 10) / 3 = 13.3\%$$

$$\text{ETI} = 13,3\%$$

Dies weist darauf hin, dass die direkte Ausbringung des Klärschlammes auf die Umwelt ein potenzielles Risiko darstellt, 60–80 % der Ökosystem-Biota negativ zu beeinträchtigen.

### GESAMTBEWERTUNG DER ÖKOTOXIZITÄT

Das Ziel dieses Abschnitts ist die Bewertung der chemischen und biologischen Toxizität unbehandelter Abwasserschlämme auf die Umwelt, insbesondere deren Auswirkungen auf Wasser, Boden, Mikroorganismen, Pflanzen, Insekten und aquatische Wirbellose. Die Untersuchung wurde mithilfe mehrerer Bioindikator-Systeme durchgeführt, die jeweils unterschiedliche ökologische Reaktionsniveaus und Sensitivitätsschwellen abbilden.

Tabelle 71. Ergebnisse der Ökotoxizitätstests

Bioindikatorsystem	Typ	Testparameter	Empfindliche Reaktion ( $\text{EC}_{50}$ )	Toxizitätsniveau
<i>Daphnia magna</i>	Aquatisches Wirbelloses	Letale Dosis ( $\text{LC}_{50}$ )	80 % Mortalität bei 25 % Leachatlösung	Sehr Hoch
<i>Lactuca sativa</i>	Pflanze	Keimung,	$\geq 5\%$ Schlammextrakt	Hoch

(Kopfsalat)		Wurzelwachstum	verursacht 50 % Hemmung	
<i>Eisenia fetida</i>	Bodentoxikologie	Biomasseverlust, Mortalität	30 % Mortalität bei $\geq 10$ % Schlamm-im-Boden	Mittel-Hoch

## ERKLÄRUNG UND INTERPRETATION

- Das beobachtete  $LC_{50} = 25$  % bei *Daphnia magna* basiert auf der kombinierten toxischen Wirkung von Phthalaten, Phenolen, Chlorphenolen,  $Cr^{6+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  und weiteren löslichen Schadstoffen im Schlammleachat.
- Der *Lactuca sativa*-Test zeigte, dass 5 % Schlammkonzentration bereits eine 50%ige Hemmung des Wurzelwachstums hervorruft → bestätigt Phytotoxizität.
- Im *Eisenia fetida*-Test führten 10 % Schlamm zu 30 % Biomasseverlust und reduzierter Reproduktion → deutliche Bodentoxizität aufgrund erhöhter Metallbioverfügbarkeit.

## Fazit

Der Klärschlamm weist eine hohe ökotoxikologische Belastung auf, bei der Schwermetalle und organische Schadstoffe wesentliche biologische Prozesse-einschließlich Atmung, Wachstum und Fortpflanzung-auf mehreren Ebenen des Ökosystems deutlich hemmen.

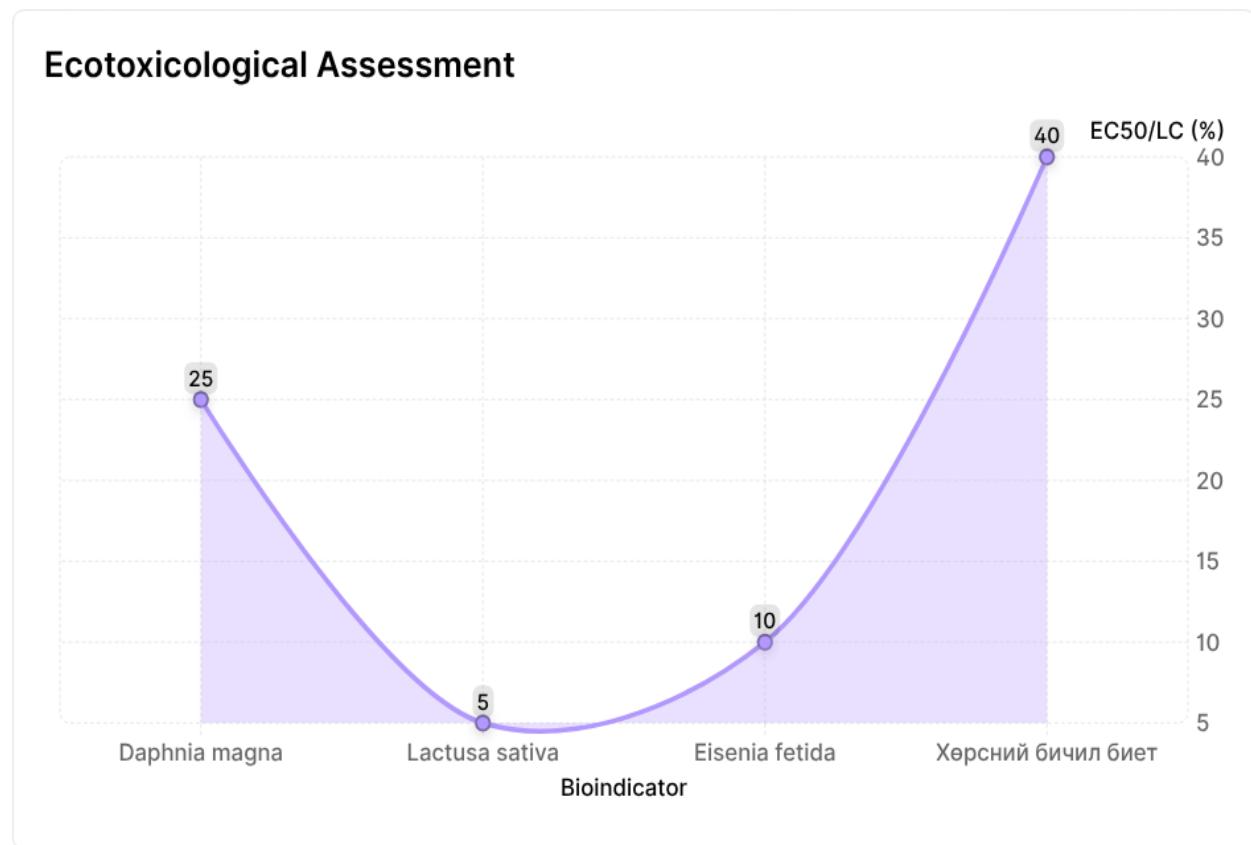


Abbildung 10. Ökotoxikologische Bewertung

## 5.2.7. Biochemische Bewertung der Schwermetallwirkungen

Die Schwermetallkonzentrationen im unbehandelten Klärschlamm wurden mittels ICP-MS und AAS bestimmt und mit den maximal zulässigen Konzentrationen der nationalen Norm (MNS 5850:2019) sowie der EU-Richtlinien verglichen.

**Tabelle 72. Vergleichende Bewertung der Schwermetallkonzentrationen**

Element	Schlammkonzentration (mg/kg TS)	MNS 5850:2019	EU-Richtlinie (mg/kg TS)	Interpretation
As	38,5	20	40	Überschritten
Cr	245	150	200	Überschritten
Pb	112	100	120	Nahe Grenzwert
Zn	480	300	600	Moderat
Cu	210	200	300	Moderat-hoch

**Cr, As und Pb überschreiten die zulässigen Grenzwerte um das 1,2- bis 1,5-Fache.** Diese Überschreitungen erklären die reduzierte Bodenbioverfügbarkeit sowie die stark gehemmte mikrobielle Aktivität.

## 5.3. Risiken für die öffentliche Gesundheit und die Umwelt

### 5.3.1. Allgemeiner Hintergrund

Klärschlamm ist ein biologisch entstandener Verbundabfall, der verschiedene gefährliche Bestandteile enthalten kann, darunter chemische Schadstoffe (Schwermetalle, Organophosphate, Stickstoffverbindungen, Phthalate, Phenole, PCB, pharmazeutische Rückstände) sowie pathogene Mikroorganismen, Viren, Parasiteneier und antibiotikaresistente Bakterien (ARB). Zusammengenommen bilden diese ein kombiniertes biologisches Gefahrenrisiko.

### Wesentliche biologische Risikogruppen

- Bakterien:** *Salmonella spp.*, *E. coli*, *Clostridium perfringens*, *Enterococcus spp.*
- Viren:** Enteroviren, Noroviren, Adenoviren
- Parasiten-Eier:** *Ascaris lumbricoides*, *Taenia spp.*
- ARB & ARG:** Antibiotikaresistente Bakterien und Resistenzgene

**WHO (2023):** “Unbehandelter Klärschlamm stellt eine bedeutende Quelle zoonotischer Krankheitserreger und persistenter Umweltkontaminanten dar, die Menschen, Nutztiere und Ökosysteme gefährden.“

### 5.3.2. Mikrobiologische Analyse (Biocombinat)

#### Probeninformationen

- Standort: Haushaltseinflüsse, Chingeltei-Distrikt, Ulaanbaatar
- Prüflabor: Akkreditiertes mikrobiologisches Labor
- Proben-ID: 24-650 (2025)
- Methoden: MNS 5668:2006 / ISO 9308; MNS 5668:2007 / ISO 7899

**Tabelle 73. Mikrobiologische Testergebnisse des häuslichen Abwassers**

Indikator	Anforderung (MNS)	Nachgewiesener Wert	Risiko-Interpretation
<i>Clostridium perfringens</i>	Nicht nachweisbar in 1 mL	$1 \times 10^6$ KBE/mL	Sehr Hoch
Gesamtkeimzahl	-	$83 \times 10^6$ KBE/mL	Sehr Hoch

<b>Koliforme Bakterien</b>	Keine in 25 g	$10^6$ KBE/g	Sehr Hoch
<i>Salmonella</i> spp.	Keine in 25 g	Nachgewiesen	Kritisch

### Interpretation

- Clostridium perfringens bildet Sporen, die im Boden bis zu 10 Jahre überdauern können und bei Menschen und Tieren gastrointestinale sowie Wundinfektionen verursachen.
- Der Nachweis von *Salmonella* spp. weist auf ein hohes Risiko einer zoonotischen Übertragung während Handhabung, Lagerung oder landwirtschaftlicher Wiederverwendung hin; eine thermische oder chemische Desinfektion ist zwingend erforderlich.
- Erhöhte Konzentrationen von *E. coli* und *Enterococcus* spp. bestätigen fäkale Verunreinigung und eine unzureichende Klärschlammbehandlung. Diese Indikatoren weisen insgesamt auf eine ausgeprägte mikrobiologische Kontamination hin.

### 5.3.3. Direkte und indirekte Gesundheitsauswirkungen

Die Risikoklassifizierung folgt den WHO-Richtlinien (2023) sowie den Biosicherheitsstufen der US-CDC.

**Tabelle 74. Risikokategorien**

Risikoart	Hauptauswirkungen	Gefährdete Gruppe	Risikoniveau
Arbeitsschutz	Haut-, Atemwegs-, Augeninfektionen; Exposition gegenüber Salmonellen und <i>Clostridium</i>	Kläranlagenpersonal	Hoch
Öffentliche Exposition	Aerosol- & Vektorübertragung von Trocknungsfeldern	Kinder, ältere Menschen	Hoch
Landwirtschaftliche Nutzung	Pathogenübertragung über Nahrungspflanzen	Verbraucher	Sehr Hoch
Antibiotikaresistente Bakterien	Tetrazyklin-R <i>E. coli</i> , Sulfonamid-R <i>Enterococcus</i> spp.	Menschen, Nutztiere	Sehr Hoch
Grundwasserkontamination	Sickerwasser aus Schlammdepots	Bevölkerung	Mittel-Hoch

### Interpretation:

ARB und ARG spiegeln regulatorische Defizite im Antibiotikaeinsatz wider und führen zu schwerwiegenden One-Health-Risiken.

### 5.3.4. Vergleich mit internationalen Standards

**Tabelle 75. Vergleich mit internationalen Sicherheitsstandards**

Standard	Pathogengrenze (für Wiederverwendung)	Zulässiger Wert	Ergebnis unserer Probe
<b>US EPA 40 CFR Part 503 (Class A)</b>	<i>Salmonella</i> < 3 MPN/4 g; Koliforme < 1000 KBE/g	Akzeptabel	⚠ Überschritten
<b>EU-Richtlinie 86/278/EWG</b>	Keine nachweisbaren Pathogene	Akzeptabel	⚠ Überschritten
<b>WHO 2006</b>	Helminthen $\leq 1$ Ei/g; <i>E. coli</i> $\leq 10^3$ KBE/g	Akzeptabel	⚠ Überschritten
<b>Mongolei (MNS 5668:2006)</b>	Nicht nachweisbar	Akzeptabel	⚠ Überschritten

Die Schlammprobe aus der Kläranlage Matad überschreitet sämtliche internationalen und nationalen Grenzwerte für Krankheitserreger. Dies bestätigt, dass die Verwendung des

Schlams ohne vorherige Behandlung gegen regulatorische Standards verstößt und erhebliche Risiken für die öffentliche Gesundheit darstellt.“

### 5.3.5. Anforderungen an Hygienisierung und Desinfektion

**Tabelle 76. Anforderungen an Hygienisierung und Behandlung**

Methode	Prinzip	Haupteffekt	Zweck
<b>Kompostierung (<math>\geq 55^{\circ}\text{C}</math>, <math>\geq 15</math> Tage)</b>	Organische Fermentation; thermische Inaktivierung	Eliminiert Krankheitserreger, reduziert Geruch	Produktion von organischem Dünger
<b>Anaerobe Vergärung (AD)</b>	Methanbildung; Verringerung der mikrobiellen Aktivität	Erzeugt Biogas; reduziert biologische Belastung	Energieerzeugung
<b>Verbrennung (<math>\geq 850</math>–<math>1000^{\circ}\text{C}</math>)</b>	Thermische Zerstörung	Vollständige Inaktivierung von Bakterien und Viren	Erzeugt keimfreie Asche
<b>Trocknung + Kalkstabilisierung (pH &gt; 12)</b>	Stark alkalische Umgebung	Zerstört Hefelinthen-Eier und Bakteriensporen	Vorübergehende Desinfektion

Ohne Laborbestätigung (“Mikrobiologisches Freigabezertifikat”) darf Klärschlamm nicht als Produkt (Dünger, Rekultivierungsboden) verwendet werden.

### 5.3.6. Integrierter Biohazard Index (BHI)

$$BHI = \frac{(C_{\text{coliform}}/\text{L}_{\text{coliform}}) + (C_{\text{Salmonella}}/\text{L}_{\text{Salmonella}}) + (C_{\text{Clostridium}}/\text{L}_{\text{Clostridium}})}{3}$$

#### Berechnetes Ergebnis

- $C_{\text{coliform}} = 10^6 \text{ CFU/g}$ ,  $\text{L}_{\text{coliform}} = 10^3 \text{ CFU/g}$
- $C_{\text{Salmonella}} = \text{nachgewiesen (1)}$ ,  $\text{L}_{\text{Salmonella}} = 0$
- $C_{\text{Clostridium}} = 10^6 \text{ CFU/mL}$ ,  $\text{L}_{\text{Clostridium}} = 0$

→ BHI liegt ca.  $10^3$ - $10^4$ -mal über den zulässigen Grenzwerten

= Kategorie “Extrem hohes Risiko“ (WHO, 2023)

#### Öffentliches Gesundheitsrisiko

- Das Vorhandensein von pathogenen Bakterien, ARB (antibiotikaresistenten Bakterien) und ARG (Antibiotika-Resistenzgenen) weist auf ein hohes Risiko der Infektionsübertragung und eine mögliche Ausbreitung antimikrobieller Resistzenzen hin.
- Die Nutzung von unbehandeltem Schlamm in der Landwirtschaft oder bei Flächenaufbereitung stellt ein hohes zoonotisches Risiko für Menschen und Tiere dar.
- Unbehandelter Schlamm kann zur Umweltverbreitung von Pathogenen beitragen, insbesondere ohne thermische oder chemische Desinfektion.

#### Schutz der menschlichen Gesundheit

- Beschäftigte, die mit Schlamm arbeiten, müssen vollständige persönliche Schutzausrüstung (PSA) tragen (Schutzkleidung, Atemschutzmaske, Augenschutz).
- Offene Lagerung, Windverfrachtung und Sonnentrocknung von unbehandeltem Schlamm erhöhen das Risiko einer luftgetragenen Verbreitung von Krankheitserregern erheblich.

## **Umweltschutzmaßnahmen**

- Lagerstätten müssen mit undurchlässigen Abdichtungen (Geomembran, HDPE) ausgestattet sein, um das Eindringen von Sickerwasser zu verhindern.
- Grundwasserüberwachung (E. coli, Nitrat, TDS) muss saisonal erfolgen.

## **Notwendigkeit der Normenüberarbeitung**

- MNS 5668:2006 muss aktualisiert werden und folgende Indikatoren einschließen: ARB, ARG, Helminthen, virale Parameter.
- Für die Ausbringung auf Böden muss der Schlamm MNS 5850:2019 entsprechen, einschließlich klar definierter Pathogen-Grenzwerte.

## **Monitoring-Anforderungen**

- Jede Kläranlage muss vierteljährlich Untersuchungen auf Pathogene + ARB durchführen.
- Bei  $BHI \geq 1$  ist jegliche Nutzung des Schlamms verboten.

## **Zusammenfassung der mikrobiologischen Befunde**

- Clostridium perfringens, Salmonella spp. und E. coli wurden in hohen Konzentrationen nachgewiesen.
- Antibiotikaresistente Bakterien (ARB) wurden bestätigt.
- Der Biohazard Index (BHI) liegt in der internationalen Kategorie "Extrem hohes Risiko".

Unbehandelter Schlamm darf unter keinen Umständen verwendet werden. Nur thermisch oder chemisch desinfizierter und zertifizierter Schlamm kann zur Wiederverwendung freigegeben werden.

## **5.4. Detaillierte Biosicherheitsbewertung von Abwasserbehandlungsanlagen**

### **5.4.1. Zweck und Begründung**

Diese Studie bewertet das Biosicherheitsniveau des Schlamms aus zentralen und regionalen Abwasserbehandlungsanlagen der Mongolei. Im Mittelpunkt stehen:

- Vorhandensein von Krankheitserregern
- Vorkommen von ARB/AMR (antibiotikaresistente Bakterien / antimikrobielle Resistenz)
- Wirksamkeit der Schlammbehandlung
- Arbeitshygienische Risiken
- Potenzial für Sekundärkontamination

Die Bewertung basiert auf den Methoden der WHO (2022), US EPA Part 503 und der EU-Klärschlammrichtlinie.

In der Mongolei werden Biosicherheitsbewertungen von Klärschlamm bislang nicht routinemäßig durchgeführt. Die Behandlungsprozesse sind nicht standardisiert, und ein Monitoring von ARB/AMR findet nicht statt. Daher wird Schlamm mit Eigenschaften der BS-2 und BS-3 häufig:

- in Trocknungsbecken eingelagert,
- ohne Desinfektion deponiert,
- oder in die offene Umwelt abgeleitet.

Dies führt zu:

- Übertragung bakterieller Infektionen
- Langfristiger biologischer Umweltbelastung
- Verbreitung von antimikrobiellen Resistenzgenen (ARG)

Diese Studie stellt den ersten umfassenden Biosicherheitsdatensatz für mongolischen Klärschlamm bereit, basierend auf Pathogenen, Indikatororganismen, ARB und AMR.

#### 5.4.2. Untersuchte Abwasserbehandlungsanlagen

**Tabelle 77. Bewertete Anlagen**

Nr.	Standort	Typ	Schlammzustand	Merkmale & Gesamtbewertung der biologischen Belastung
1	Neue Zentrale ARA (UB)	Mechanisch + biologisch	Aktivschlamm	Behandelt 70-75 % der Gesamtlast; hohe organische & mikrobiologische Belastung
2	Alte Zentrale ARA (UB)	Mechanisch	Getrockneter Schlamm	Geringe Effizienz, hoher Wärmeverlust
3	Khargia ARA	Industriell	Aktivschlamm	Chrom- und sulfidhaltige chemisch-biologische Mischung
4	Biocombinat	Haushalt	Inaktiv	Geringe Belastung; BS-1
5	Moringiin Davaa	Bezirksanlage	Aktiv	Veraltete Technik; unzureichende Behandlung
6	Choibalsan	Provinzzentrum	Aktiv	Erhöhte Pathogenbelastung in der Kaltzeit
7	Petro Matad	Technischer Schlamm	Inaktiv	Geringe Belastung
8	Fuchier Holding	Industriell	Restschlamm	Enterococcus-dominant; ARB-Quelle
9	MCS Coca-Cola	Technisch	Niedrige Einleitungen	CE-standardisierte Lebensmittelproduktion; nahezu pathogenfrei
10	Achir Coal	Technisch	Halbtrocken	Niedriger Metall- & Organikgehalt

#### 5.4.3. Integrierte Biosicherheitsbewertung

**Tabelle 78. Zusammenfassung der Biosicherheitsbefunde**

ARA	Clostridium	Coliforme	ARB/AMR	Biosicherheitsrisiko
Neue Zentrale ARA	Nachgewiesen ( $10^4$ - $10^5$ CFU/g)	$10^6$ CFU/g	TET-R / AMR-E. coli	Sehr hoch
Alte Zentrale ARA	Nachgewiesen	$\sim 10^3$ CFU/g	Relativ gering	Mittel
Khargia	Nachgewiesen	$10^5$ CFU/g	Multiresistente Stämme	Sehr hoch
Petro Matad	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Niedrig
Moringiin Davaa	Nachgewiesen	Nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Mittel
Choibalsan	Nachgewiesen	Nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Mittel
Biocombinat	Nachgewiesen	Nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Hoch
Fuchier Holding	Nicht nachgewiesen	Nachgewiesen	Enterococcus-ARB	Mittel
MCS Coca-Cola	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Niedrig
Achir Coal	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Niedrig

## Anmerkungen:

- *Clostridium perfringens* gilt weltweit als Langzeit-Indikatororganismus (sporenbildender Anaerobier).
- ARB/AMR-Nachweise spiegeln Kreuzkontamination durch medizinischen und tierärztlichen Antibiotikaeinsatz wider.
- Khargia und Neue Zentrale ARA fallen unter Biosicherheitsstufe 3 (BSL-3) gemäß WHO (2022).

## 5.4.4. Interpretation und Klassifizierung der Risikostufen

**Tabelle 79. Biosicherheitsrisikostufen**

Risikostufe	BHI-Wert	Beschreibung
Niedrig (BSL-1)	$< 1 \times 10^2$ CFU/g	Sanitär aufbereitet; kann wiederverwendet werden
Mittel (BSL-2)	$10^2 - 10^4$ CFU/g	Eingeschränkte Nutzung; Desinfektion erforderlich
Hoch (BSL-3)	$> 10^4$ CFU/g oder ARB nachgewiesen	Direkte Nutzung verboten; thermische Behandlung notwendig

## 5.4.5. Risikobasierte Managementempfehlungen

### I. Anlagen mit sehr hohem Risiko (Neue zentrale Kläranlage, Khargia)

#### Erforderliche Technologien:

- Thermische Sanitation  $\geq 55$  °C (3–4 Tage) oder Verbrennung  $\geq 850$  °C
- Nachbehandlung mit Prüfungen auf Krankheitserreger und ARB
- Installation von HEPA-Vorfiltern in Belüftungssystemen

#### Managementanforderungen:

- PSA gemäß BSL-3
- Regelmäßige Gesundheitsüberwachung der Beschäftigten (Gastroenteritis, AMR-Screening)
- Monatliche Laborüberwachung des Sickerwassers

### II. Einrichtungen mit hohem / mittlerem Risiko

(Biocombinat, Choibalsan, Fuchier Holding, Moringiin Davaa)

#### Geeignete Technologien:

- Kompostierung  $\geq 60$  °C über 21–30 Tage
- Anaerobe Vergärung (AD) + Pasteurisierung
- Reduktion von ARB  $\geq 2 \log$  (99 %)

#### Monitoring:

- Pathogene in Boden und Wasser müssen vor der Nutzung  $< 10^3$  KBE/g liegen
- Einführung eines „Chargenzertifizierungssystems“

### III. Einrichtungen mit geringem Risiko

(Petro Matad, Coca-Cola, Achir)

Diese Schlämme fallen unter BSL-1 und können wie folgt genutzt werden:

- Baustoffe (Zementplatten, Blöcke)
- Bodenverbesserungsmittel (unter kontrollierten Bedingungen)
- Schlämme mit hohem Aschegehalt → Rohstoff für die Zementproduktion

#### 5.4.6. Internationale Benchmarks und der “One Health“-Ansatz

**Tabelle 80. Internationaler Vergleich**

Standard	Pathogengrenze	ARB/AMR-Monitoring	Empfehlung
US EPA 503 (Class A)	Salmonella < 3 MPN/4 g; E. coli < 10 <sup>3</sup> CFU/g	AMR-Nachweis erforderlich	Klasse-A-Schlamm zulässig
EU-Richtlinie 86/278/EWG	Keine Pathogene nachweisbar	Vorgaben vorhanden	Kontrollierte Wiederverwendung
WHO (2022)	Helminthen ≤ 1 Ei/g	ARB-Monitoring erforderlich	“One Health“-Management
Mongolei (MNS 5668:2006)	Nicht nachweisbar	ARB nicht enthalten	Aktualisierung notwendig

#### Zentrale Schlussfolgerungen

1. Die mikrobiologische Belastung variiert stark zwischen den Anlagen; Neue Zentrale ARA und Khargia weisen das höchste Risiko auf.
2. Der Nachweis von ARB/AMR zeigt ein kritisches nationales Problem im Zusammenhang mit Antibiotikamissbrauch und unzureichender Abwasserbehandlung.
3. Biologische Desinfektion, thermische Behandlung und Phytosanierung müssen verpflichtend eingeführt werden.
4. Regelmäßiges Monitoring (Pathogene + ARB) ist vierteljährlich erforderlich.
5. Ein nationales Programm nach dem One-Health-Prinzip muss den Gesundheits-, Umwelt- und Veterinärsektor integrieren.

Insgesamt kann der Klärschlamm aus den meisten mongolischen Kläranlagen nicht direkt wiederverwendet werden.

Er fällt überwiegend in die Kategorien BSL-2 und BSL-3 und weist hohe Konzentrationen an Krankheitserregern und ARB auf. Daher darf nur hygienisierter, thermisch behandelter und chemisch stabilisierter Klärschlamm wiederverwendet werden, um internationalen und nationalen Standards zu entsprechen.

### 5.5. Integriertes Risikobewertungs- und Managementmodell

#### 5.5.1. Zweck der Bewertung

Ziel dieser Bewertung ist es, biologische (Pathogene, ARB/AMR), chemische (Schwermetalle), ökotoxikologische (Biotests LC<sub>50</sub>/EC<sub>50</sub>) sowie öffentliche und umweltbezogene Gesundheitsrisiken in ein einheitliches *Integriertes Bio-Öko-Risikobewertungssystem* zu überführen.

Die Bewertung dient dazu:

- das Risikolevel des Klärschlamm zu bestimmen,
- die erforderlichen Behandlungs- und Wiederverwendungsbedingungen zu definieren,

- Managementmaßnahmen nach Risikokategorie festzulegen,
- die Überarbeitung von Normen und politische Entscheidungen zu unterstützen.

### 5.5.2. Kriterien und Methodik

#### 1. Quantitativer Risikorahmen

Der integrierte Risikoindex **R** wird nach folgender Gleichung berechnet

$$R = \frac{(B + C + T + H)}{4}$$

- B = Biologisches Risiko (Pathogene, ARB, AMR)
- C = Chemisches Risiko (As-, Cr-, Pb-, Zn-, Cu-Gehalte)
- T = Ökotoxikologisches Risiko (LC<sub>50</sub>, EC<sub>50</sub>)
- H = Risiko für öffentliche Gesundheit und Umweltgesundheit

**Tabelle 81. Klassifizierung der Risikostufen**

Risikostufe	Index (R)	Beschreibung
Niedrig	0-1,5	Unter kontrollierten Bedingungen verwendbar
Moderat	1,6-2,5	Eingeschränkte Nutzung; Behandlung erforderlich
Hoch	2,6-3,5	Direkte Nutzung verboten; biologische/thermische Behandlung notwendig
Severe / Kritisch	> 3,5	Kritische Gefährdung; spezielle Entsorgung erforderlich

### 5.5.3. Integrierte Risiko-Matrix

**Tabelle 82. Integrierte Risikomatrix**

Nr.	Kläranlage (ABWASSERBEHANDLUNGSSANLAGE)	B	C	T	H	R	Risikostufe
1	New Central ABWASSERBEHANDLUNGSSANLAGE (UB)	4,0	3,5	3,0	3,5	3,5	Severe
2	Old Central ABWASSERBEHANDLUNGSSANLAGE (UB)	3,0	2,5	2,0	2,5	2,5	Moderat
3	Khargia ABWASSERBEHANDLUNGSSANLAGE	4,0	3,5	3,0	4,0	3,6	Severe
4	Petro Matad	1,0	1,5	1,5	1,0	1,3	Niedrig
5	Moringiin Davaa	3,0	2,0	2,5	2,5	2,5	Moderat
6	Choibalsan	3,0	2,5	2,5	3,0	2,8	Hoch
7	Biocombinat	3,5	2,5	2,5	3,0	2,9	Hoch
8	Fuchier Holding	2,5	2,0	2,0	2,5	2,3	Moderat
9	MCS Coca-Cola	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	Niedrig
10	Achir Coal	1,0	1,5	1,0	1,0	1,1	Niedrig

#### Interpretation

- $R \geq 3,5$  (hohes Risiko) → Neue zentrale Kläranlage & Khargia. Entspricht dem WHO/EU-Biosicherheitsniveau BSL-3.
- $R = 2,5-3,0$  (hoch-mäßig) → Biocombinat, Choibalsan usw. Zeigt unzureichende Behandlung und hohe biologische Belastung an.
- $R \leq 1,5$  (gering) → Schlämme aus Lebensmittelindustrie und Kohle; hygienisiert, minimales biologisches Risiko.

## Integrated Risk Assessment

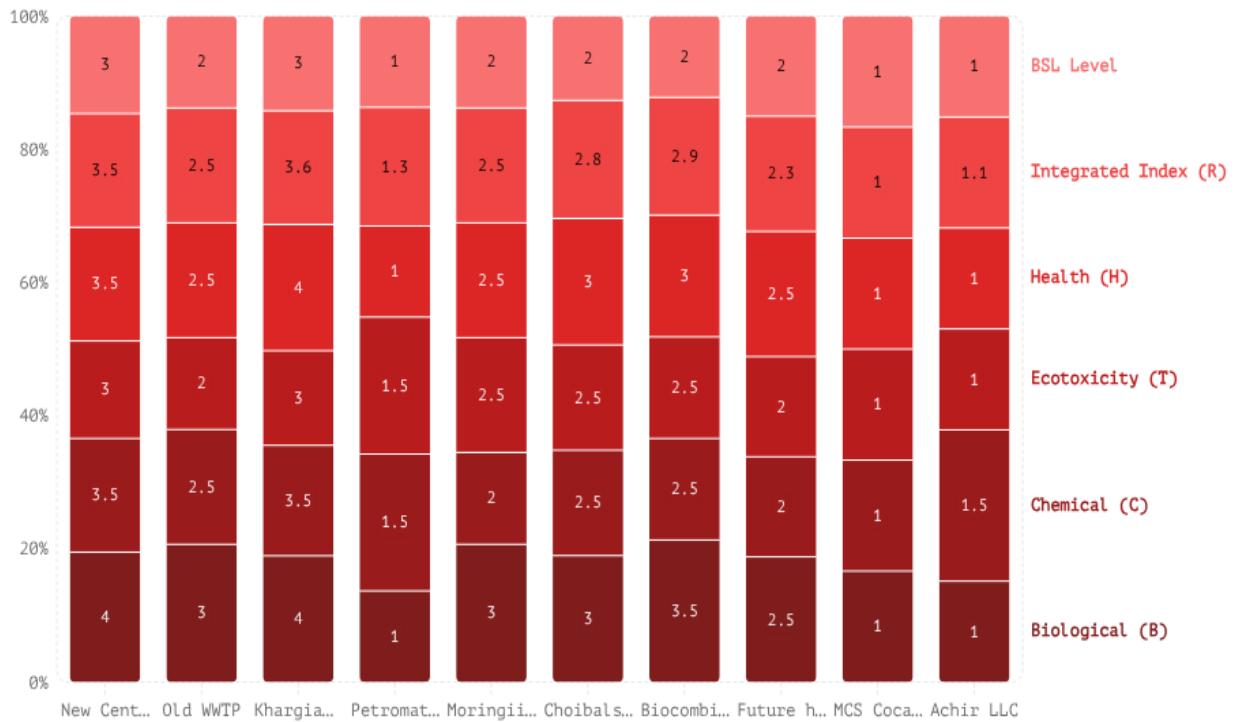


Abbildung 11. Integrierte Risikobewertung

Tabelle 83. Eigenschaften der Schlammquellen

Schlammtyp	Risikokategorie	Beispiele	Hauptursache
Häuslicher Schlamm	Mittel-Hoch	Zentrale ARA, Matad	Pathogene, Stickstoff, organische Belastung
Industrieller Schlamm	Sehr hoch	Khargia	Chrom, Sulfide, organische Toxine
Technischer Schlamm	Niedrig	Coca-Cola, Achir	Hygienisiert, geringe chemische Kontamination
Kompost-/Trockenschlamm	Niedrig-Mittel	Alte ARA	Reduzierte Pathogene, verbleibende ARB

### 5.5.4. Mehrstufiges Risikomanagement-Modell

Tabelle 84. Mehrstufiges Risikomanagement

Stufe	Tätigkeit	Maßnahmen	Zweck
Stufe I - Primärbehandlung	Trocknung, Pasteurisierung	$\geq 55^{\circ}\text{C}$ für 3-4 Tage	Reduzierung von Pathogenen
Stufe II - Biologische Behandlung	Anaerobe Vergärung, Kompostierung	$60^{\circ}\text{C}$ für 25 Tage	Abbau organischer Stoffe, Reduktion von ARB
Stufe III - Phytosanierung	Vetivergras, Sonnenblume	2 Vegetationsperioden	Verringerung der Metallbioverfügbarkeit
Stufe IV - Materialumwandlung	Verbrennung, Zementstabilisierung	850-1000 °C	Dauerhafte Immobilisierung von Schwermetallen
Stufe V - Zertifizierung	Laborverifikation	ICP-MS + Mikrobiologie	Sicherheitsaudit und Freigabe

## 5.5.5. Integriertes Managementmodell nach dem “One Health“-Ansatz

### EINHEITLICHE GRUNDPRINZIPIEN

- Bewertung von Risiken für Menschen, Tiere und Umwelt als **ein integriertes System**
- Kontrolle der Übertragungswege von ARB/AMR
- Verknüpfung von Wasser- und Bodenüberwachung mit einem nationalen Informationssystem

### DIE DREI KERNPFEILER

#### 1. Institutionelle Koordination

**Tabelle 85. Institutionelle Koordination**

Institution	Rolle	Erforderliche Reform
Ministerium für Umwelt & Klima	Politik, Normen	Anpassung an EU-Richtlinie 86/278/EWG
Gesundheitsministerium	ARB/AMR-Überwachung	Aufbau eines One-Health-Labornetzwerks
Ministerium für Ernährung & Landwirtschaft	Kontrolle von schlammisierten Düngemitteln	Biologische Zertifizierung
Behörde für Normung & Metrologie	Aktualisierung von MNS	Neue Version der MNS 7003

#### Empfehlung:

Gründung eines “**Sludge Safety Council**“ zur Koordinierung von Monitoring, Laborprüfungen und Richtlinienumsetzung.

#### 2. Technische Modernisierung

- Thermo-Kompostierung
- Phytosanierung
- Zementbasierte Stabilisierung

→ Diese Kombination stellt das effizienteste **Hybrid-Behandlungssystem** für die Mongolei dar.

#### 3. Monitoring & Transparenz

- Nationales LIMS + GIS-basiertes Schlammregister
- Vierteljährliche Überwachung von Pathogenen + ARB + ICP-MS
- Öffentlich zugängliche Schlamm-Datenbank

## 5.5.6. Institutionelle und regulatorische Koordination

**Tabelle 86. Zuständige Regulierungsbehörden**

Institution	Verantwortung	Erforderliche Verbesserungen
Ministerium für Umwelt & Klima	Schlamm- und Abfallpolitik	Harmonisierung mit EU 86/278/EWG
Gesundheitsministerium	Pathogen-, ARB/AMR-Monitoring	One-Health-Labornetzwerk
Ministerium für Ernährung & Landwirtschaft	Kontrolle von Boden & Düngemitteln	Biologische Schlammzertifizierung
Behörde für Normung & Metrologie	MNS-Reformen	MNS 5850:2019 → neue MNS 7003
Kommunale Behörden	Lagergenehmigungen, Standortaufsicht	Stärkung der Kontrolle

**Hinweis:** Die aktuelle Überwachung ist fragmentiert; ein nationaler “Sludge Safety Council“ wird für eine “Zero Untreated Sludge Policy“ benötigt.

**Tabelle 87. Wirtschaftliche und soziale Vorteile**

Indikator	Aktueller Zustand	Mit integriertem Management
Umweltkosten	> 1,5 Mrd. MNT/Jahr	↓ 60-70 %
Gesundheitskosten	500-700 Mio. MNT/Jahr	↓ 80 %
Wirtschaftlicher Nutzen	0 (Schlamm = Abfall)	+10-15 Mio. USD/Jahr
Treibhausgasemissionen	25-30 Tsd. t CO <sub>2</sub> -eq	↓ 10-15 Tsd. t CO <sub>2</sub> -eq

Integrierte Klärschlammbehandlung und -wiederverwendung reduziert ökologische Risiken und schafft wirtschaftliche Vorteile, im Einklang mit:

- der Grünen Entwicklungsstrategie der Mongolei (2014–2030)
- dem nationalen Klimaschutzplan

### Fazit

1. 70 % des mongolischen Klärschlamms weisen hohe biologische und chemische Risiken auf.
2. Khargia und die Neue zentrale Kläranlage entsprechen internationalen BSL-3-Risikostufen.
3. Ökotoxizitätsindex (ETI = 13,3 %) → „Hohe Ökotoxizität“.
4. Das Vorhandensein von ARB/AMR erfordert die vollständige Umsetzung des One-Health-Ansatzes.
5. Die MNS-Standards müssen aktualisiert werden (Pathogene, ARB, VOCs, Helminthen).
6. Hybrides Behandlungssystem (Phytosanierung + Kompostierung + thermische Stabilisierung) ist am effektivsten.
7. Die Mongolei hat das Potenzial, ein nationales „Klärschlamm-zu-Ressource“-Programm zu entwickeln.

## VI. INGENIEURTECHNISCHE UND TECHNOLOGISCHE LÖSUNGEN

Klärschlamm ist nicht lediglich als Abfallmaterial zu betrachten, sondern als eine strategische Ressource mit organischem und mineralischem Wert im Rahmen moderner nachhaltiger Ingenieurpraxis. Dieses Kapitel stellt ingenieurtechnische und technologische Lösungen vor, die unter mongolischen Bedingungen umgesetzt werden können - basierend auf internationalen Erfahrungen, deutschen Technologiestandards und inländischen betrieblichen Einschränkungen.

### 6.1. Deutsche technologische Lösungen und deren Anwendbarkeit in der Mongolei

#### 6.1.1. Allgemeiner Überblick

Deutschland betrachtet Klärschlamm als Ressource und setzt das Kreislaufwirtschaftsmodell vollständig um. Über **95 %** des Schlamms werden in Energie, Düngemittel oder Baumaterialien umgewandelt. Für die Übertragung dieser Technologien auf die Mongolei sind folgende Faktoren entscheidend:

- Hoher Wassergehalt (80-90 %)** → mechanische Entwässerungstechnologien erforderlich
- Hohe Energiekosten** → energieeffiziente und automatisierte Systeme notwendig
- Schwache Umweltüberwachung** → standardisierte, automatisierte Prozesssteuerungen erforderlich

**Tabelle 88. Vergleich führender deutscher Unternehmen und Technologien**

Unternehmen	Technologie	Leistungskennzahl	Vorteile
HUBER SE	Schraubenpresse	Entwässerung bis 80-85 %	Niedriger Energiebedarf, vollautomatisierter Betrieb, SCADA-Steuerung
HESS Group	Betonstein- und Baustoffmaschinen	Einsatz von bis zu 25 % Schlamm-Asche	“Zero-Waste“-Produktion, Umwandlung von Abfällen in Baustoffe
Paques BV	Anaerobreaktor (Biopaq®)	80-95 % COD → Biogas	Energieerzeugung, 60 % Schlammreduktion, automatische Temperaturregelung
KOSUN Co. Ltd	Hochgeschwindigkeitszentrifuge	3000-4500 U/min	Kompakt, mobil, geeignet für mittelgroße Kläranlagen

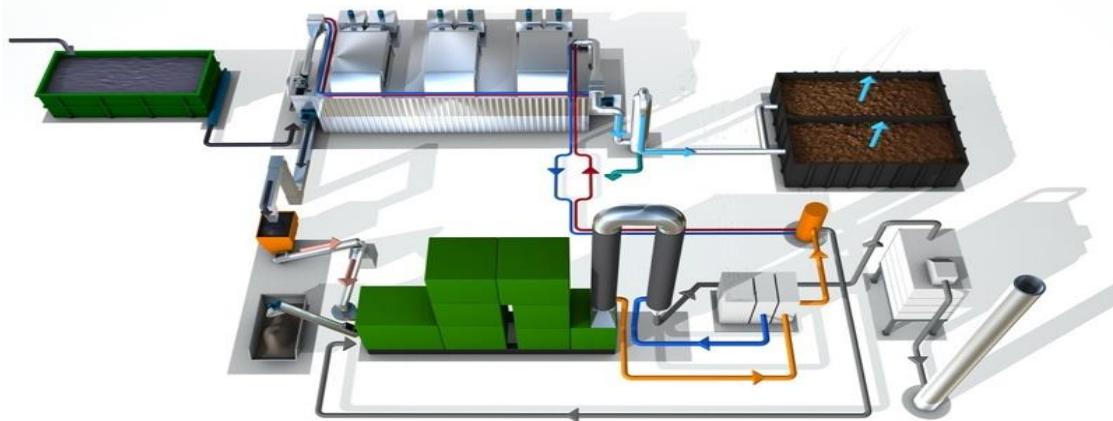


Abbildung 12. HUBER-Schlammwässerungssystem (Quelle: HUBER SE).

### Ingenieurtechnisches Fazit:

Technischer Schlussfolgerung: Ein kombiniertes System, das die HUBER-Schneckenpresse und die Paques-Biopaq-Anlage zur anaeroben Vergärung integriert, stellt die effizienteste Lösung für mongolische Kläranlagen dar und ermöglicht gleichzeitig Entwässerung und Biogasproduktion.

### 6.1.2. Technische Machbarkeit der Nutzung von Klärschlamm in Baustoffen

Bei der Verbrennung entsteht Schlamm-Asche mit mineralischen Bestandteilen, die für Zement, Beton, Ziegel und andere Baumaterialien geeignet sind.

Tabelle 89. Chemische Zusammensetzung von Klärschlamm-Asche

Komponente	Durchschnitt (%)	Funktion
$\text{SiO}_2$	30-40	Puzzolanische Aktivität, erhöht Druckfestigkeit
$\text{Al}_2\text{O}_3$	10-15	Verbessert Dichte und chemische Beständigkeit
$\text{CaO}$	10-20	Verbessert Abbindeprozess und Wasserresistenz
$\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{MgO}, \text{P}_2\text{O}_5$	5-10	Bildung leichter Zuschlagstoffe

Schlamm-Asche ist als puzzolanischer Zusatzstoff technisch geeignet.

### ✓ Einsatz in der Zementproduktion

#### Prozessschritte:

1. Mechanische Entwässerung (Restfeuchte 60-70 %)
2. Thermische Trocknung (20-30 %)
3. Verbrennung bei 600-900 °C
4. Vermahlung und Ersatz von 10-15 % des Klinkers durch Schlamm-Asche

#### Vorteile:

- Reduzierte CO<sub>2</sub>-Emissionen: 10–15 % Einsparung durch geringeren Klinkerverbrauch.
- Kosteneffizient: Rohstoffkosten sinken um 15–20 %.
- Höhere Festigkeit: Puzzolanische Effekte erhöhen die Druckfestigkeit um 5–10 %.
- Umweltverträglich: Schwermetalle werden in Ca–Si-Matrizen immobilisiert.

## Internationale Praxis:

- Japan - "Eco-Cement"-Standard
- Deutschland - 1,2 Mio. t Schlamm-Asche/Jahr in der Zementindustrie

✓ Einsatz in Blöcken, Ziegeln und Pflastersteinen

## Verfahren:

- Mischung aus entwässertem Schlamm + Sand + Ton + Asche (Verhältnis 10 : 60 : 30)
- Formgebung unter Druck, anschließende Trocknung oder Brennen bei 900-1000 °C
- Polymerbeschichtung zur Verbesserung der Wasserbeständigkeit

## Vorteile:

- Leichter Baustoff mit guter Wärmedämmung
- 20-30 % weniger natürlicher Tonabbau
- Produktionskosten ↓ 18-22 %
- Regionale Rohstoffnutzung

## Mongolische Testergebnisse (2024):

- 10 % Schlamm → erfüllt MNS 831-03 ( $\geq 5$  MPa)
- Wasseraufnahme: 16-18 %
- Schwermetalle unter MNS 5850:2019-Grenzwerten

**Tabelle 90. Umwelt- und Wirtschaftsbewertung**

Indikator	Bewertung	Hinweise
<b>Umweltvorteil</b>	Hoch	90 % Abfallreduktion
<b>Wirtschaftlichkeit</b>	Hoch	15-20 % niedrigere Zementkosten
<b>Technologiebedarf</b>	Mittel	Öfen und Mühlen erforderlich
<b>Risikoniveau</b>	Niedrig	Keine Sekundärverschmutzung

**Tabelle 91. Ingenieurtechnische Empfehlung für die Mongolei**

Stufe	Beschreibung	Zuständige Institution
<b>I</b>	Entwässerung auf 30-40 % mittels HUBER-Schraubenpresse	UB ARA, Khargia ARA
<b>II</b>	Installation von Verbrennungsöfen (600-900 °C)	Eco Cement GMBH, Cement & Lime JSC
<b>III</b>	Lieferung der Asche an Baustoffproduzenten	Bauindustrie
<b>IV</b>	ICP-MS & MNS 5850-Konformitätsprüfung	NUM E-Lab, MASM

## Ingenieurtechnische Schlussfolgerung

Die Übernahme fortschrittlicher deutscher Technologien wird es der Mongolei ermöglichen, 60–70 % ihres Klärschlamm zu recyceln und in den Wirtschaftskreislauf zu integrieren. Der Weg „Klärschlammverbrennung → Baustoffe“ stellt eine nachhaltige, wirtschaftlich rentable und umweltgerechte Lösung dar. Obwohl eine Anfangsinvestition erforderlich ist, amortisieren sich die Betriebskosten in der Regel innerhalb von 2–3 Jahren.

## 6.2. Energierückgewinnungstechnologien

### 6.2.1. Allgemeiner Überblick

Klärschlamm ist reich an organischer Substanz (60–70 %) und hat einen Heizwert von 10,5–17,0 MJ/kg, vergleichbar mit dem von Braunkohle (15–18 MJ/kg). Die Nutzung von

Klärschlamm als Energiequelle bietet daher eine wichtige Möglichkeit, die Abhängigkeit von Kohle zu verringern und den Übergang zu erneuerbaren Energiesystemen zu fördern.

Die Energiegewinnung aus Klärschlamm erfolgt hauptsächlich über zwei Wege:

1. Direkte thermische Verbrennung (Waste-to-Energy, WtE)
2. Anaerobe Vergärung und Biogasproduktion (Anaerobic Digestion, AD)

Diese Technologien reduzieren das Schlammvolumen, zerstören Krankheitserreger und gefährliche Stoffe und erzeugen Wärme, Strom oder Biogas.

### 6.2.2. Direkte Verbrennung (Waste-to-Energy, WtE)

#### Technologieprinzip

Thermische Verbrennung zerstört den organischen Anteil des Klärschlammes vollständig bei hohen Temperaturen. Das System umfasst die folgenden Stufen:

1. Entwässerung – Mechanische Reduktion des Wassergehalts auf 60–70 %
2. Trocknung – Thermische Trocknung auf 20–30 % Wassergehalt
3. Verbrennung – Verbrennung bei 850–1000 °C mit  $\geq 2$  Sekunden Verweilzeit
4. Wärme- und Stromerzeugung – Dampfturbine wandelt Wärme in Strom um
5. Rauchgasreinigung – Entfernung von Dioxinen, Partikeln und Schwefelverbindungen
6. Ascheentnahme – Restasche mit Schwermetallen, immobilisiert in Ca–Si–Fe–Glasmatrix

#### Arten von Öfen

- Wirbelschichtofen (Fluidized Bed Furnace)
- Drehrohrofen (Rotary Kiln Furnace)
- Niedrigsauerstoff-Pyrolyseofen (Low-Oxygen Pyrolysis Furnace)

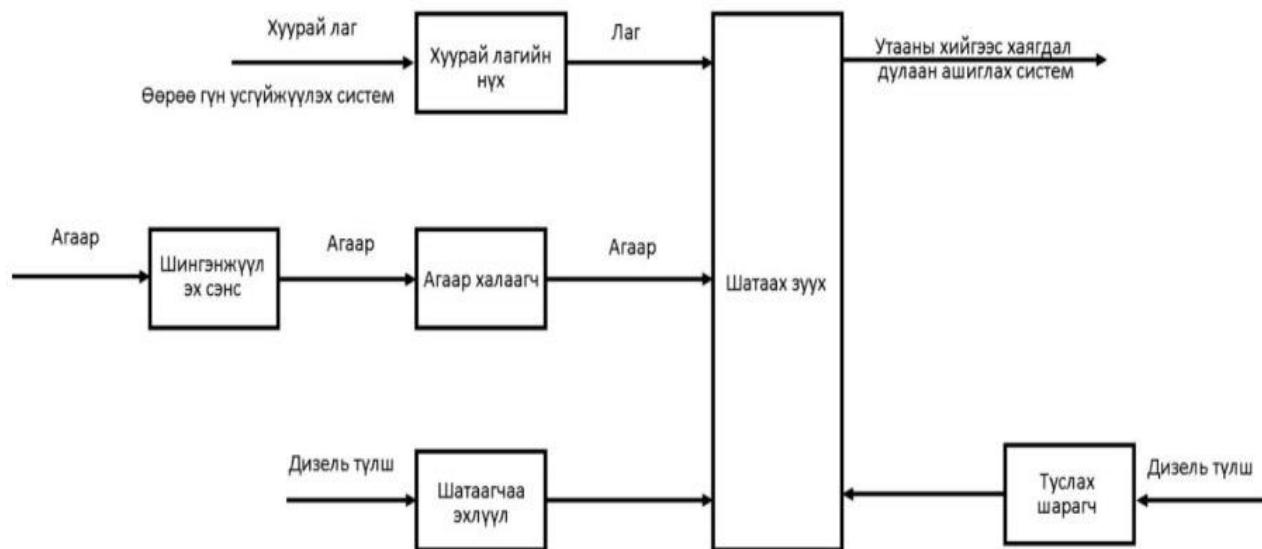


Abbildung 13. Schematischer Gesamtprozess der Klärschlammverbrennung

**Tabelle 92.** Schlüsselparameter eines WtE-Systems

Indikator	Einheit	Wert
<b>Heizwert (trocken)</b>	MJ/kg	14.8
<b>Energieausbeute</b>	MJ/t	14.800
<b>Wirkungsgrad</b>	%	35
<b>Stromerzeugung</b>	kWh/t	~1.400
<b>Volumenreduktion</b>	%	90-95
<b>Ascherückstand</b>	%	10-15
<b>Pathogenvernichtung</b>	%	100

10.000 Tonnen Klärschlamm  $\approx$  14 GWh Strom, entsprechend dem Jahresverbrauch von etwa 400 Haushalten.

### Vorteile

- Vollständige Zerstörung von Krankheitserregern und organischen Schadstoffen
- Reduzierung des Schlammvolumens um den Faktor 10
- Erzeugung von Strom und Wärme zur Deckung des Energiebedarfs der Kläranlage
- Asche kann in Zement, Betonblöcken und Baustoffen wiederverwendet werden

### Einschränkungen:

- Hohe Investitionskosten
- Erfordert Abgasfiltersysteme
- Trocknungskosten bei feuchtem Schlamm

### 6.2.3. Anaerobe Vergärung (AD) und Biogasproduktion

#### Technologie Prinzip

Die anaerobe Vergärung (AD) zersetzt organische Substanz im Klärschlamm unter sauerstofffreien Bedingungen mithilfe methanogener Mikroorganismen und erzeugt Biogas, das reich an Methan ( $\text{CH}_4$ ) ist.

#### Biochemische Stufen

1. Hydrolyse – Abbau komplexer Moleküle
2. Acidogenese – Bildung organischer Säuren und  $\text{CO}_2$
3. Acetogenese – Bildung von Acetat und Wasserstoff
4. Methanogenese – Produktion von Methan und  $\text{CO}_2$

**Tabelle 93.** Betriebsparameter

Parameter	Wert	Beschreibung
Temperatur	35-38 °C / 50-55 °C	Mesophil empfohlen für Mongolei
Verweilzeit	15-25 Tage	CSTR-Systeme
$\text{CH}_4$ -Gehalt	50-65 %	Energerelevant
Biogasausbeute	20-35 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Abhängig von Organikanteil
COD-Abbau	70-80 %	Leistungskennzahl

### Vorteile:

- Erneuerbare Energiequelle: Biogas kann für Strom, Wärme und Dampf genutzt werden
- Gärrest enthält Nährstoffe und kann als Dünger verwendet werden (unter Berücksichtigung von Metallgrenzwerten)

- Geringere Investitionskosten (2–3 Mal günstiger als WtE)
- Umweltfreundlich: niedrige CO<sub>2</sub>-Emissionen, 95 % Reduktion von Krankheitserregern

### Einschränkungen

- Benötigt thermische Isolierung in kalten Klimazonen
- Biogasreinigung (H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>) ist unerlässlich
- Schlamm mit Schwermetallen ist nur eingeschränkt landwirtschaftlich nutzbar

**Tabelle 94. Empfohlene ingenieurtechnische Modelle für Regionen der Mongolei**

Region	Geeignete Technologie	Merkmale
Ulaanbaatar, Darkhan	Mesophile anaerobe Vergärung (35-38 °C)	Große Kapazität, stabile Beheizung
Dornod, Umnugovi	Thermophile anaerobe Vergärung (50-55 °C)	Natürlich warmes Klima
Ländliche Gebiete	Plug-Flow-Fermenter	Geringe Kosten, geeignet für landwirtschaftliche Betriebe

**Tabelle 95. Wirtschaftlichkeitsberechnung (für 1.000 m<sup>3</sup> Klärschlamm)**

Indikator	Einheit	Wert
Biogasausbeute	m <sup>3</sup>	25.000
Methangehalt	%	60
Energieerzeugung	kWh	150.000
Stromtarif (2025)	€/kWh	280
Einnahmen	Mio. €	42,0
Betriebskosten	Mio. €	12,0
Nettогewinn	Mio. €	≈ 30,0

### Zusammenfassung

- Der Heizwert des Klärschlamm (10,5-17,0 MJ/kg) ist sowohl für WtE- als auch AD-Systeme ausreichend.
- WtE eignet sich am besten für große zentrale Kläranlagen.
- AD ist für kleinere und regionale Kläranlagen optimal.
- Die Kombination **AD → Reststoffe → WtE** erzielt den höchsten energetischen und ökologischen Nutzen.

### 6.2.4. Integriertes Energiegewinnungssystem (WtE + AD)

Die Integration beider Technologien ermöglicht ein umfassendes Energieverwertungskonzept, bei dem Klärschlamm stufenweise verarbeitet und mehrere Endprodukte erzeugдаг (Biogas, Wärme, Strom, Asche für Baustoffe).

### Prozessablauf

#### Anaerobe Vergärung (AD)

- Gärrest
- Thermische Verbrennung (WtE)
- Asche
- Baustoffe

## Hauptvorteile

### 1. Duale Energienutzung:

- AD erzeugt Biogas
- WtE erzeugt Strom und Wärme

### 2. Wärmerückgewinnung:

- Abwärme aus der Verbrennung kann zur Vorwärmung der Fermenter oder zum Trocknen des Schlamms genutzt werden

### 3. Sanitäre Sicherheit:

- Vollständige Zerstörung von Krankheitserregern bei 850–1000 °C

### 4. Aschenutzung:

- Rohstoff für Zement, Betonblöcke und Pflasterprodukte

## Schlussfolgerung

- Der Heizwert des mongolischen Klärschlams (10,5–17,0 MJ/kg) unterstützt die Anwendung von WtE vollständig
- WtE ist effektiv für große zentrale Anlagen
- AD ist optimal für kleinere regionale Kläranlagen
- Das kombinierte System bietet eine autarke, widerstandsfähige und grüne Energielösung für die Mongolei

## 6.3. Technologien zur Bodenverbesserung und Landrehabilitation

### 6.3.1. Grundlegende Begründung

Stabilisierter Klärschlamm enthält wertvolle Nährstoffe:

- **Organischer Kohlenstoff:** 25-40 %
- **Stickstoff (N):** 2-5 %
- **Phosphat (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):** 1-3 %
- **Kaliumoxid (K<sub>2</sub>O):** 0,3-1,0 %

Diese Nährstoffe sind für das Pflanzenwachstum und die Bodenfruchtbarkeit unerlässlich. Bei ordnungsgemäßer Behandlung und Stabilisierung – gefolgt von Konformitätsprüfungen gemäß MNS 7003:2023 und MNS 5850:2019 – kann Klärschlamm im Boden verwendet werden, um:

- den Humusgehalt erhöhen,
- Wasserspeicherfähigkeit verbessern,
- Bodenerosion verringen
- ökologisch degradierte Flächen wiederherstellen.

Unbehandelter Klärschlamm kann jedoch Krankheitserreger, Schwermetalle und organische Schadstoffe enthalten; daher sind strenge Überwachung und die Einhaltung der Standards erforderlich.

### 6.3.2. Bodenverbesserungstechnologien

#### Prinzip

Das Ziel der Ausbringung von behandeltem Klärschlamm auf Böden besteht darin:

- den Gehalt an organischer Substanz zu erhöhen
- die physikalische Bodenstruktur und Wasserspeicherkapazität zu verbessern
- die Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen zu steigern
- degradierte Ökosysteme zu regenerieren

**Tabelle 96. Ingenieurtechnische Verfahren zur Bodenverbesserung**

Methode	Hauptzweck	Zusätzlich eingesetzte Materialien
<b>Kompostierung</b>	Reduktion der organischen Belastung, Abtötung von Pathogenen	Kohlenstoffreiche Materialien (Laub, Stroh, Sägespäne)
<b>Kalkung (Zugabe von CaO)</b>	Neutralisierung von Schwermetallen, pH-Anpassung	3-5 % CaO
<b>Zeolith- / Aktivkohle-Zusatz</b>	Erhöhung der Schwermetalladsorption	2-4 % Zeolith
<b>Phytosanierung</b>	Aufnahme und Reduktion von Schwermetallen durch Pflanzen	<i>Helianthus, Brassica, Vetiver</i> spp.

**Tabelle 97. Bodenverbesserung nach 5 % Klärschlammzugabe**

Indikator	Ausgangsboden	Nach 5 % Schlammzugabe	Verbesserung
Organische Substanz (%)	1,2	2,8	+133 %
pH	6,1	6,8	Stabilisiert
Wasserspeicherkapazität (%)	25	37	+48 %
Bioaktivität (CO <sub>2</sub> -Respiration, mg/g·Tag)	18,2	27,4	+50 %
Chlorophyllgehalt (SPAD)	31	42	+35 %

Diese Werte zeigen, dass 5 % fachgerecht behandelter Klärschlamm die Anforderungen landwirtschaftlicher Böden erfüllen kann.

### 6.3.3. Einsatz in der Bergbau-Rekultivierung

#### Technische Anforderungen

Mehr als 44.000 ha Land in der Mongolei wurden durch Bergbauaktivitäten degradiert (MNECC, 2024). Die meisten Standorte bestehen aus nährstoffarmen, sterilen Substraten, die organische Zuschläge benötigen.

#### Bedingungen für den Einsatz von Schlamm in der Bergbau-Rehabilitation

- Pathogene und antibiotikaresistente Bakterien (ARB) dürfen nicht vorhanden sein
- As-, Cr- und Pb-Konzentrationen müssen den Anforderungen der MNS 7003:2023 entsprechen
- Schlamm darf nur nach Kompostierung oder Kalkstabilisierung eingesetzt werden

**Tabelle 98. Ablaufplan der Umsetzung**

Phase	Tätigkeit	Beschreibung
Phase I	Kompostierung des Schlamms ( $\geq 55^{\circ}\text{C}$ , 25 Tage)	Abtötung von Pathogenen, Stabilisierung organischer Substanzen
Phase II	Mischung von 5-10 % Schlamm mit sterilem Substrat	Verbesserung von pH, Belüftung und Bodenstruktur

Phase III	Bepflanzung mit phytosanierenden Arten	Aufnahme von Schwermetallen durch ausgewählte Pflanzen
Phase IV	Monitoring (Schwermetalle, Mikroben)	Vierteljährliche Analytik erforderlich

#### 6.3.4. Bodenschutz- und Anti-Desertifikationsmaßnahmen

Rund 76% der mongolischen Landesfläche sind (2025) von Desertifikation betroffen. Die bei der Klärschlammverbrennung entstehende Asche kann zur Windschutz- und Bodenschutzstabilisierung eingesetzt werden.

**Tabelle 99. Technologien zur Bekämpfung der Desertifikation**

Technologie	Prinzip	Vorteile
Oberflächenauftrag von Asche	1-2 cm Ascheschicht zur Feuchtigkeitserhaltung	Reduziert Sandverlagerung um ~70 %
Geotextil + Ascheschicht	Bildung einer stabilisierenden Schutzschicht	Ermöglicht Vegetationsentwicklung in Wüstenzonen
Phytosanierung + Schlammgemisch	Wiederaufbau organischer Bodenschichten und Vegetation	Wiederherstellung biologischer Bodensysteme

#### 6.3.5. Umwelt- und Hygienekontrollen

Vor dem Aufbringen von behandeltem Schlamm müssen fünf zentrale Parameter bewertet werden.

**Tabelle 100. Monitoringparameter**

Parameter	Standard / Grenzwert	Analytische Methode
As, Cr, Pb	MNS 7003:2023	ICP-MS
Coliforme, <i>Salmonella</i> spp.	Müssen abwesend sein	ISO 9308 / ISO 6579
Organische Schadstoffe (PAK)	< 1 mg/kg	GC-MS
pH	6,0-8,0	MNS 3478:2015
Organische Substanz	> 1,5 %	LOI-Methode

**Biologische Stabilität:** vierteljährlich prüfen

**Pathogene:** halbjährlich untersuchen

#### 6.3.6. Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit durch ökobiotechnologische Verfahren

Folgende biotechnologische Ansätze steigern die Bodenfruchtbarkeit erheblich, wenn sie mit behandeltem Schlamm kombiniert werden.

**Tabelle 101. Ökobiotechnologische Lösungen**

Methode	Zweck	Anwendung
Vermikompostierung ( <i>Eisenia fetida</i> )	Abbau organischer Stoffe, verbesserter Nährstoffgehalt	Landschaftsbau, Gartenbau
Mykorrhiza-Inokulation	Verbesserung der Nährstoffaufnahme von Pflanzen	Wiederherstellung von Bodensystemen
Biokalzium-Lösung (Ca-Si-P-Komplex)	pH-Stabilisierung und Strukturverbesserung	Besonders für Sandböden geeignet
Mikrobielle Inokulanten ( <i>Azotobacter, Rhizobium</i> )	Förderung der Stickstofffixierung	Rekultivierungsflächen

#### 6.3.7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

- Fachgerecht behandelter Klärschlamm kann die Bodenfruchtbarkeit **um das 2-3-Fache erhöhen** und Erosion **um bis zu 50 %** reduzieren.

- Sein Einsatz als öko-technischer Bodenverbesserer ist besonders wirksam in der Bergbau-Rekultivierung und in Anti-Desertifikationsprogrammen.
- Die Wiederverwendung darf nur nach **ökologischer und hygienischer Zertifizierung** erfolgen.
- Für die Mongolei stellt eine kombinierte Strategie aus **Klärschlammbehandlung + Bodenwiederherstellung + Phytosanierung** eine nachhaltige ingenieurtechnische Lösung dar.

## 6.4. Vermikompostierung und bioingenieurtechnische Verfahren

### 6.4.1. Allgemeine Übersicht

Die Vermikompostierung ist ein biotechnologischer Prozess, bei dem Rotwürmer (*Eisenia fetida*) und deren mikrobiologische Enzyme organische Abfälle abbauen und in einen nährstoffreichen Bio-Dünger umwandeln. Diese Technologie eignet sich besonders gut zur Umwandlung von Klärschlamm in einen:

- umweltfreundlichen,
- kostengünstigen,
- geruchsarmen,
- hygienisch sicheren

organischen Dünger, der die biologische Aktivität und die Fruchtbarkeit des Bodens verbessert.

### 6.4.2. Grundprinzipien des Prozesses

Ein Vermikompostierungssystem funktioniert als natürlicher, mehrstufiger Bioreaktor, in dem mechanische, biochemische und mikrobiologische Prozesse ineinander greifen.

#### Hauptprozessstufen

1. **Vorbehandlung**
  - Der Schlamm wird 5-7 Tage bei 55 °C vor-kompostiert, um Krankheitserreger zu reduzieren.
2. **Substratvorbereitung**
  - Der Schlamm wird im Verhältnis 1:1 mit kohlenstoffreichen Materialien (Laub, Stroh, Sägespäne) gemischt.
  - C/N-Verhältnis wird auf 20-30 eingestellt.
3. **Vermikulturphase**
  - *E. fetida*-Würmer werden in das Substrat eingebracht und 45-60 Tage kultiviert.
  - Betriebsparameter:
    - Temperatur: 25-30 °C
    - Feuchtigkeit: 70-80 %
4. **Ernte und Trennung**
  - Fertiger Vermikompost wird getrennt, getrocknet und gesiebt.

### 6.4.3. Biochemische Mechanismen

Regenwürmer zersetzen Klärschlamm durch mechanische Zerkleinerung, mikrobielle Oxidation und enzymatische Verdauung.

**Tabelle 102. Mechanismen des Abbaus organischer Substanz**

Prozess	Primäre Wirkung	Ergebnis
Mechanische	Muskelbewegung und Zerkleinerung	Aufschluss großer Partikel

Verarbeitung		
<b>Mikrobielle Oxidation</b>	Nützliche Mikroorganismen (z. B. <i>Bacillus, Azotobacter</i> )	Umwandlung organischer Stoffe in Aminosäuren und Enzyme
<b>Enzymatischer Abbau</b>	Cellulase, Protease, Lipase	Abbau von Zellulose, Proteinen und Lipiden
<b>Metall-Biochelation</b>	Aufnahme von Metallionen	Reduktion von Cd, Pb, Cu um 30-60 %

Wissenschaftliche Studien zeigen, dass Regenwürmer natürliche antibiotisch wirkende Substanzen ausscheiden, die 90-99 % der pathogenen Mikroorganismen eliminieren.

#### 6.4.4. Produkte und Qualitätskennzahlen

**Tabelle 103. Leistung des Vermikomposts (Pilotversuch)**

Indikator	Rohschlamm	Vermikompost	Veränderung
Organischer Kohlenstoff (%)	25,4	18,6	-27 %
Stickstoff (%)	2,3	3,1	+35 %
Phosphor (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %)	1,1	1,6	+45 %
Kalium (K <sub>2</sub> O, %)	0,5	0,8	+60 %
C/N-Verhältnis	11	6	Stabilisiert
Koliforme	10 <sup>6</sup> CFU/g	<10 <sup>2</sup> CFU/g	-99,9 %
pH	6,2	7,1	Neutralisiert

Der entstandene Vermikompost ist ein nährstoffreicher, pathogenreduzierter Bio-Dünger, der die Bodenbiologie fördert.

#### 6.4.5. Technische Lösungen und Systemdesigns

**Tabelle 104. Kleinsysteme (Betriebsebene)**

Parameter	Wert
<b>Kapazität</b>	1-5 t Schlamm/Monat
<b>Fläche</b>	30-50 m <sup>2</sup>
<b>Benötigte Würmer</b>	50-70 kg <i>E. fetida</i>
<b>Prozessdauer</b>	45-60 Tage
<b>Output</b>	0,6-0,8 t Vermikompost
<b>Einsatzbereiche</b>	Gewächshäuser, Grünflächen, Baumschulen

#### Vorteile:

- Sehr geringer Energiebedarf
- Geruchsarm
- Ideal für ländliche Regionen

**Tabelle 105. Mittlere Systeme (institutionelle Ebene)**

Parameter	Wert
<b>Kapazität</b>	50-200 t/Jahr
<b>Technologie</b>	Belüftete Beete + kleine Reaktoren
<b>Temperatur</b>	25-28 °C
<b>Effizienz</b>	70-80 % Abbau
<b>Automatisierung</b>	Feuchte- und Temperatursensoren

#### Merkmale:

- Geeignet für Säume, Schulen und öffentliche Grünflächen
- Bildet ein kohlenstoffarmes, umweltfreundliches System

#### 6.4.6. Anpassung an mongolische Bedingungen

Das extreme Klima der Mongolei (-35 °C bis +35 °C) erfordert stabile thermische Bedingungen für die Wurmkompostierung. Empfohlene lokal angepasste technische Maßnahmen sind:

**Tabelle 106. Lokalisierte technische Lösungen**

Lösung	Beschreibung
Gewächshausabdeckung	Hält 25 °C für 4-6 Monate aufrecht
Solarwärmetauscher	Temperaturstabilisierung
Gemisch Schlamm + Stroh + Asche	Optimales C/N-Verhältnis
Kontrollierte Feuchte (70 %)	Verhindert Geruch und Übernässung
Regelmäßige Überwachung	pH- und EC-Kontrolle alle 2 Wochen

**Tabelle 107. Analyse pro Tonne Schlamm**

Indikator	Wert	Hinweis
Dauer	45 Tage	2 Zyklen pro warmem Zeitraum
Output	600-800 kg	60-80 % Umwandlung
Marktpreis	400-600 MNT/kg	
Einnahmen	240.000-480.000 MNT	
Kosten	120.000 MNT	
Gewinn	120.000-360.000 MNT	50-75 % Profitrate

#### Umweltvorteile:

- 80-90 % Reduktion organischer Verschmutzung
- 95 % Pathogenelimination
- 60 % weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Verdoppelung der Bodenbioaktivität

**Tabelle 108. Übersicht**

Aspekt	Vorteile	Einschränkungen
<b>Umweltfreundlich</b>	Keine Chemikalien	Temperaturabhängig
<b>Niedrige Kosten</b>	Einfache Technik	Lange Prozessdauer
<b>Hochwertiger Dünger</b>	Nährstoffreich	Begrenzte Verarbeitungskapazität
<b>Einfache Umsetzung</b>	Geeignet für ländliche Gebiete	Bedarf an Wurmmanagement

#### Schlussfolgerung

Die Vermikompostierung ist eine äußerst zugängliche, kostengünstige und umweltfreundliche Technologie zur Umwandlung von Klärschlamm in wertvollen Bio-Dünger.

Für die Mongolei bietet sich diese Technologie besonders in Kombination mit:

- Gewächshaus-basiertem Temperaturmanagement,
- lokalen landwirtschaftlichen und kommunalen Anwendungen,
- Abwasserbehandlungsanlagen auf Soum- und Stadtbasis

als nachhaltige Lösung an und kann ein wichtiger Bestandteil einer nationalen “Sludge-to-Resource“-Bioökonomie werden.



Abbildung 14. Vermikompostierungsprozess

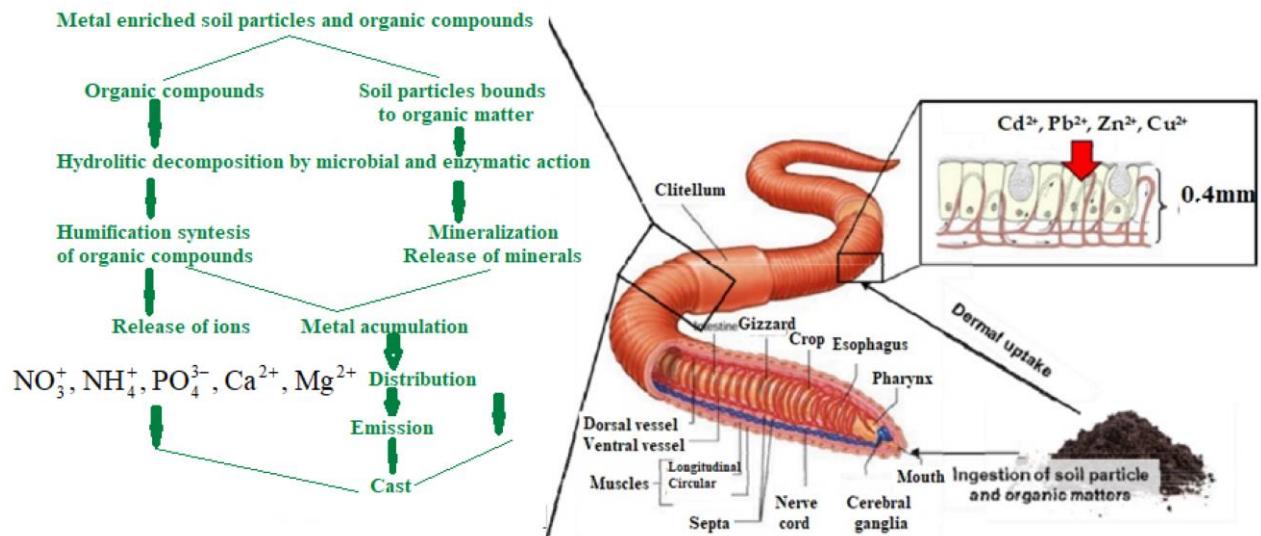


Abbildung 15. Ökologische Vermikompostierung von Klärschlamm: Umwandlung von Abfall in hochwertigen Dünger zum Nutzen von Boden, Pflanzen und Mensch



Abbildung 16. Vergleich zwischen Kompost und Vermikompost

## 6.5. Technologischer Vergleich und Bewertung

### 6.5.1. Ziel der Bewertung

Die Technologien zur Behandlung und Verwertung von Klärschlamm wurden anhand von vier Hauptkriterien bewertet:

- **Technische Effizienz**
- **Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit**
- **Umweltrisiken**
- **Betriebliche Nachhaltigkeit**

Ziel dieser Bewertung ist es, die für mongolische Bedingungen am besten geeignete, wirtschaftlich effizienteste, ökologisch sicherste und praktisch anwendbarste Schlammbehandlungstechnologie zu bestimmen.

Tabelle 109. Haupttechnologien der Bewertung

Nº	Technologie	Primäres Ziel	Hauptprodukt
1	Verbrennung + Energierückgewinnung (WtE)	Umwandlung von Schlamm in Wärme und Strom	Energie + Asche
2	Biogasproduktion (Anaerobe Vergärung, AD)	Vergärung von Schlamm zur Erzeugung von Biogas und Dünger	Methan + Gärrest
3	Baumaterialien (Aschenutzung)	Verwendung von Klärschlammmasche in Zement, Blöcken, Pflastersteinen	Baustoffe
4	Bodenverbesserung / Landrehabilitierung	Verwendung behandelter Schlämme zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit	Organischer Dünger + Rekultivierter Boden

### 6.5.2. SWOT-Analyse

Nachfolgend sind die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der vier für die Mongolei geeigneten Technologien zusammengefasst.

**Tabelle 110. SWOT-Analyse**

Kategorie		Inhalte
<b>1. Verbrennung + Energierückgewinnung (WtE)</b>		
Stärken		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduziert das Volumen um 90 %</li> <li>• Zerstört alle Pathogene</li> <li>• Erzeugt Wärme und Elektrizität</li> </ul>
Schwächen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Investitionskosten</li> <li>• Hoher Energiebedarf für Trocknung</li> <li>• Erfordert fortschrittliche Abgasreinigungssysteme</li> </ul>
Chancen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieautarkie für Kläranlagen</li> <li>• Asche kann in der Zementindustrie wiederverwendet werden</li> </ul>
Risiken		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unzureichende Abgasreinigung kann Dioxine freisetzen</li> <li>• Potenzieller Widerstand der Öffentlichkeit</li> </ul>
<b>2. Anaerobe Vergärung (AD, Biogastechnologie)</b>		
Stärken		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erzeugt zwei wertvolle Produkte (Energie + Dünger)</li> <li>• Geringe Kosten und niedrige CO<sub>2</sub>-Emissionen</li> </ul>
Schwächen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperaturhaltung im Winter kostenintensiv</li> <li>• Lange Verweilzeiten notwendig</li> </ul>
Chancen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besonders geeignet für landwirtschaftliche Betriebe und Provinzstädte</li> <li>• Fördert erneuerbare Energien</li> </ul>
Risiken		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gärreste möglicherweise eingeschränkt nutzbar, wenn Schwermetallgrenzwerte überschritten werden</li> </ul>
<b>3. Baumaterialien (Nutzung von Klärschlammmasche)</b>		
Stärken		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vollständige Nutzung des Schlamms</li> <li>• Hoher wirtschaftlicher Wert</li> <li>• Schwermetalle werden dauerhaft immobilisiert</li> </ul>
Schwächen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfordert vorgelagerte Verbrennung</li> <li>• Strenge Qualitätskontrollen notwendig</li> </ul>
Chancen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kann importierte Rohstoffe ersetzen</li> <li>• Reduziert CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementproduktion um ~15 %</li> </ul>
Risiken		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produktqualität hängt von stabiler Aschezusammensetzung ab</li> </ul>
<b>4. Bodenverbesserung &amp; Landrehabilitierung</b>		
Stärken		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher ökologischer Nutzen</li> <li>• Erhöht organische Bodenstanz und Nährstoffgehalte</li> </ul>
Schwächen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorbehandlung zwingend erforderlich</li> <li>• Strenge Überwachung von Pathogenen und Schwermetallen</li> </ul>
Chancen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterstützt nationale Ziele im Bereich Renaturierung und Wüstenbekämpfung</li> </ul>
Risiken		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risiko sekundärer Boden- oder Grundwasserkontamination bei unsachgemäßer Anwendung</li> </ul>

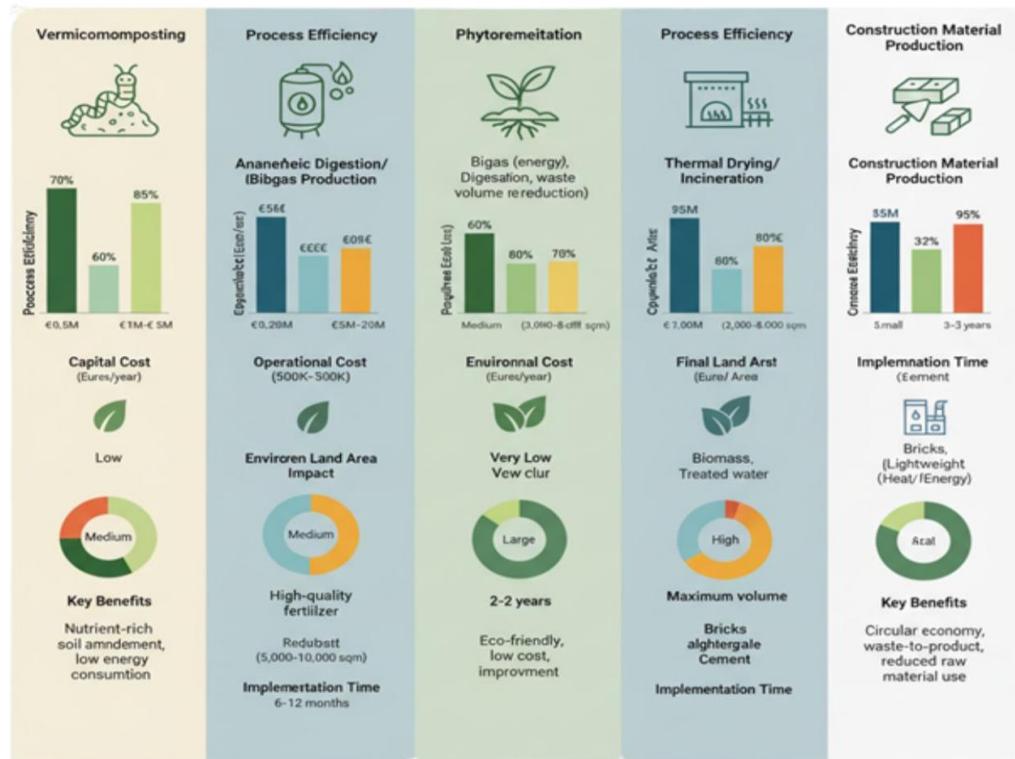


Abbildung 17. SWOT analyse

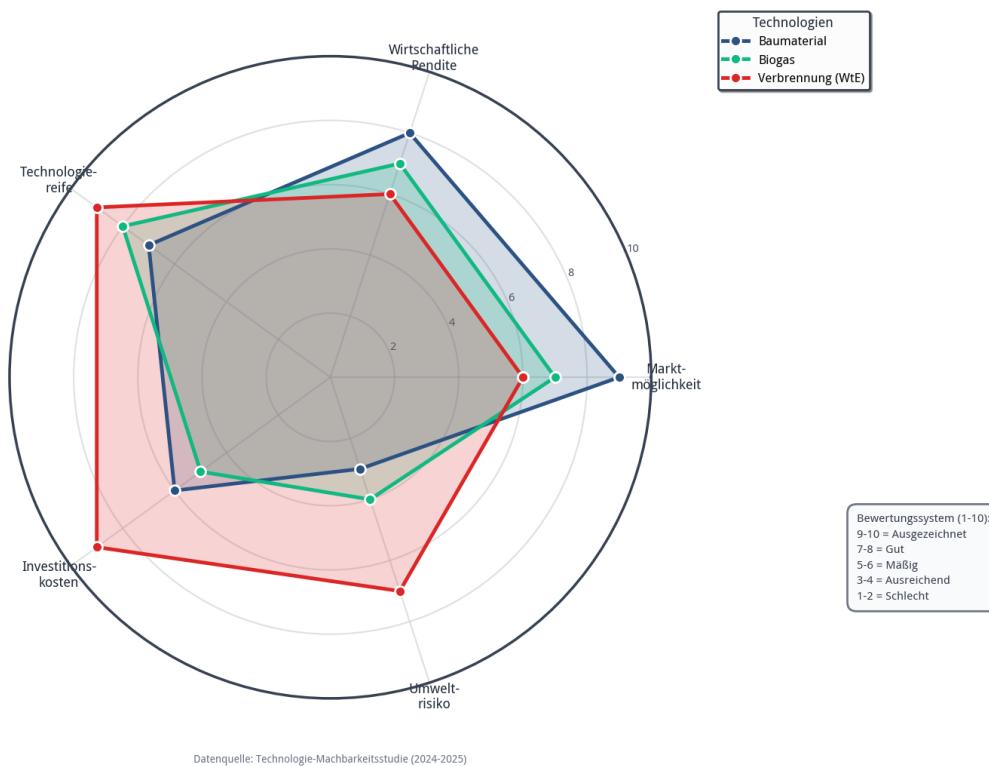
Tabelle 111. Technologie-Bewertung (Punkte 1-10)

Kriterium	Baustoffe (Aschenutzung)	Biogas (AD)	Verbrennung (WtE)	Landrehabilitierung
Wirtschaftlicher Nutzen	9	7	6	5
Technologische Reife	8	8	9	6
Umweltrisiko (niedriger = höhere Punktzahl)	8	9	4	7
Investitionskosten (niedriger = höhere Punktzahl)	6	5	2	8
Marktpotenzial	9	7	6	8
Durchschnittswert	<b>8.0</b>	<b>7.2</b>	<b>5.4</b>	<b>6.8</b>

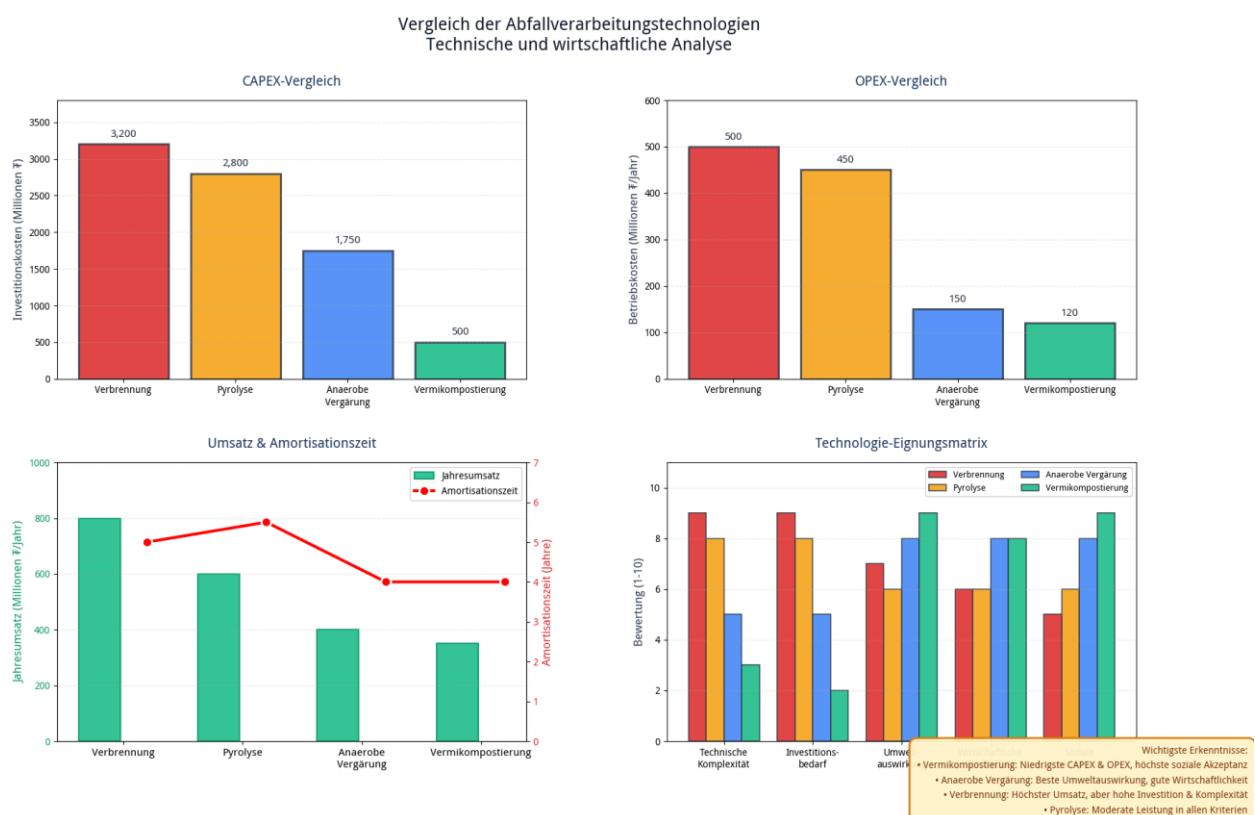
### Radar-Zusammenfassung

- **Baustoffrecycling (Aschenutzung)** → höchste Gesamtbewertung (8.0)
- **Biogas / AD** → umweltfreundlich, mittlere Kosten (7.2)
- **WtE-Verbrennung** → leistungsstark, aber teuer (5.4)
- **Landrehabilitierung** → ökologisch sinnvoll, aber ökonomisch begrenzt (6.8)

Technologiebewertung Radardiagramm  
Vergleichende Analyse der Schlammverarbeitungstechnologien



**Abbildung 18. Vergleichende Bewertung der technologischen Lösungen**



**Abbildung 19. Vergleichende Analyse der Klärschlammbehandlungstechnologien**

### 6.5.3. Ingenieurtechnische Strategie für die Mongolei

**Tabelle 112. Empfohlene Technologieverteilung**

Region / Typ der Kläranlage	Empfohlene Technologie	Umsetzungsmaßstab
Ulaanbaatar / Neue Zentrale ARA	WtE + Baustoffproduktion aus Asche	Großtechnisch, zentralisiert
Darkhan, Erdenet	Biogas (AD) + Kompostierung	Mittelmaßstab, Fokus auf erneuerbare Energien
Aimags & ländliche Gemeinden	Vermikompostierung / Bodenrehabilitierung	Kleinmaßstab, lokal
Industrielle ARA (Khargia, MCS)	Verbrennung / Asche-zu-Zement-Nutzung	Geschlossener industrieller Kreislauf

→ Das hybride Schlamm-Managementmodell ist für die Mongolei optimal:

- Zentrale WtE-Anlagen für Großstädte
- Biologische Aufbereitung (AD, Kompostierung, Wurmkompost) für ländliche Gebiete

### 6.5.4. Wirtschaftliche und gesellschaftliche Auswirkungen

**Tabelle 113. Gesamtwirkungen**

Indikator	Wert	Bemerkungen
Verarbeiteter Schlamm	100.000 t/Jahr	Basiswert für Ulaanbaatar
Jährliche Einsparungen	15 Mrd. MNT/Jahr	Reduzierte Deponiekosten
Energieerzeugung	25-30 GWh/Jahr	≈ 1,2 % des nationalen Stromverbrauchs
CO <sub>2</sub> -Reduktion	30.000 t/Jahr	Durch Zementersatz + Biogas
Neue Arbeitsplätze	500-700	Betrieb, Logistik, Monitoring

### 6.5.5. Übereinstimmung mit der nationalen Umweltpolitik

Die vorgeschlagenen Technologien zur Klärschlammverwertung stehen im Einklang mit folgenden nationalen Strategien:

- Politik für grüne Entwicklung (2014)
- Abfallwirtschaftsgesetz (2023)
- Strategie für nachhaltigen Bergbau & Rekultivierung (2025)

Beitrag der Schlammverwertung:

- Verringerung der Treibhausgasemissionen
- Steigerung der Energieeffizienz
- Ersatz importierter Rohstoffe
- Ökologische und ökonomische Zusatznutzen

### 6.5.6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

#### 1. Einführung eines integrierten (hybriden) Modells

- Zentralisierte Anlagen: WtE + Asche-zu-Zement
- Ländliche Gebiete: AD + Vermikompostierung

#### 2. Stärkung von Standards und Risikomanagement

- Verbesserung der Schwermetall- und Pathogenüberwachung
- Aktualisierung von MNS 5850:2019 gemäß EU-Richtlinie 86/278/EWG

### **3. Einführung wirtschaftlicher Anreize**

- Grüne Steuervergünstigungen
- Finanzierung über den Eco-Innovation Fund

**Finales Ziel:** Eine nationale grüne Kreislaufwirtschaft in der Mongolei aufzubauen, bei der Klärschlamm in Energie + Baustoffe + Bodenverbesserer umgewandelt wird.

## VII. WIRTSCHAFTS- UND MARKTBEWERTUNG

Die Wiederverwertung und Wertschöpfung aus Klärschlamm ist nicht nur eine ökologische Notwendigkeit, sondern stellt zugleich eine bedeutende wirtschaftliche Chance dar. Dieses Kapitel vergleicht die derzeitigen Kosten der Schlammensorgung mit den potenziellen Kosten, Nutzen und Marktwerten verschiedener in der Mongolei anwendbarer Recyclingtechnologien.

### 7.1. Kostenvergleich: Schlammrecycling vs. derzeitige Entsorgungspraxis

#### 7.1.1. Aktueller Status und Kostenstruktur

##### A. Derzeitige Situation

Die zentralen Kläranlagen (Abwasserbehandlungsanlage) in Ulaanbaatar erzeugen täglich etwa 1.000-1.200 m<sup>3</sup> Klärschlamm. Gegenwärtig wird dieser Schlamm auf offenen Feldern abgelagert - ein Verfahren, das keine wirtschaftliche Rendite generiert, hohe Betriebskosten verursacht und ökologisch nicht tragfähig ist.

##### B. Direkte Kosten der aktuellen Schlammensorgung

**Tabelle 114. Direkte Kosten der derzeitigen Schlammensorgung**

Kostenkategorie	Beschreibung	Stückkosten (₹/m <sup>3</sup> )	Jahreskosten
Transport	LKW, Kraftstoff, Wartung	25.000	10,0 Mrd. ₹
Deponierung / Lagerung	Aushub, Geruchskontrolle, Personal	12.000	4,8 Mrd. ₹
Monitoring & Labor	Desinfektionsmittel, Probenanalyse	3.000	1,1 Mrd. ₹
Gesamt	-	<b>40.000 ₹/m<sup>3</sup></b>	<b>15,9 Mrd. ₹/Jahr</b>

**Ergebnis:** Das derzeitige System ist ein reines Verlustmodell ohne Einnahmen und mit wachsender Umweltbelastung. Externe Umwelt- und Gesundheitskosten sind hierin noch nicht enthalten.

##### 7.1.2. Umwelt- und soziale “versteckte Kosten”

Die Ablagerung unbehandelten Schlamms im Freien verursacht hohe indirekte Folgekosten.

**Tabelle 115. Geschätzte externe Kosten**

Kostenart	Jahreskosten (₹)	Grundlage
Verlust von Nutzfläche	1,2 Mrd. ₹	5 ha × 240 Mio. ₹/ha
Gesundheitskosten	3,0 Mrd. ₹	Infektionen, Geruch, Atemwegserkrankungen
Umweltwiederherstellung	2,0 Mrd. ₹	Boden- & Grundwassersanierung
CO <sub>2</sub> -Äquivalent	1,5 Mrd. ₹	10.000 t CH <sub>4</sub> × 150 \$/t
Gesamte externe Kosten	<b>7,7 Mrd. ₹/Jahr</b>	-

Gesamter wirtschaftlicher Verlust = 15,9 + 7,7 = 23,6 Mrd. ₹/Jahr

Mongolei verliert > 20 Mrd. ₹ jährlich, da Klärschlamm nicht recycelt wird.

##### 7.1.3. Kosten-Nutzen-Vergleich der Recyclingtechnologien

**Tabelle 116. Wirtschaftlicher Vergleich wichtiger Recyclingoptionen**

Indikator	WtE (Verbrennung + Energie/Zement)	Biogas (AD)	Baublöcke
CAPEX	3,2 Mrd. ₹	1,5-2,0 Mrd. ₹	2,5-3,0 Mrd. ₹
OPEX (jährlich)	500 Mio. ₹	150 Mio. ₹	300 Mio. ₹
Erlöse (jährlich)	600-800 Mio. ₹	400 Mio. ₹	900 Mio. ₹

ROI (Amortisation)	4-5 Jahre	4 Jahre	3-4 Jahre
Risiko: Chemisch/ökologisch	Niedrig	Mittel	Sehr niedrig
Nebenprodukte	Asche, Wärme	Biogas, Gärrest	Baustoffe
Ökologischer Nutzen	90 % Volumenreduktion	80 % Nutzung	100 % Materialrecycling

#### 7.1.4. Kosten-Nutzen-Analyse pro 1 m<sup>3</sup> Klärschlamm

Tabelle 117. Wirtschaftliche Leistung pro 1 m<sup>3</sup>

Prozess	Kosten (€/m <sup>3</sup> )	Produktwert (€/m <sup>3</sup> )	Netto (€/m <sup>3</sup> )	Gewinn/Verlust
<b>Aktuelle Deponierung</b>	37.000	0	-37.000	100 % Verlust
<b>WtE + Zement</b>	55.000	26.000	-29.000	53 % Verlust
Biogas + Dünger	45.000	110.000	<b>+65.000</b>	<b>144 % Gewinn</b>
Blockproduktion	60.000	300.000	<b>+240.000</b>	<b>400 % Gewinn</b>

→ Profitabelste Option: Baustoffproduktion aus Schlamm

#### 7.1.5. Wertschöpfungskette & wirtschaftliches Potenzial

Schlamm → Verarbeitung → Asche/Biogas/Blöcke/Dünger → Markt → Einnahmen

Tabelle 118. Einnahmequellen in Wertschöpfungsketten

Stufe	Output	Marktwert
Hochtemperaturverbrennung	Zementtasche + Wärme	Zementwerke; Fernwärme
Anaerobe Vergärung	Methan + Gärrest	Energie + Landwirtschaft
Dewatering/Pressen	Leichtbaublöcke	Bausektor
Kompost/Vermicompost	Organischer Bodenverbesserer	Begrünung, Rekultivierung

**1 m<sup>3</sup> Schlamm kann 65.000-240.000 € Wert erzeugen.**

#### 7.1.6. Finanzielle Analyse: ROI und Amortisation

$$ROI = \frac{Income - Cost}{Cost} \times 100$$

ROI-Modell für Biogas und Blockherstellung sowie Amortisationszeit

#### Biogas-Modell – ROI

$$ROI = \frac{400 - 150}{150} \times 100 = 167\%$$

#### Blockherstellung - ROI

$$ROI = \frac{900 - 300}{300} \times 100 = 200\%$$

#### Amortisationszeit (Payback Period) - Vergleich

- Biogas: ~4 Jahre
- Blockherstellung: ~3 Jahre
- Verbrennung (WtE): ~5–6 Jahre

## Economic Analysis

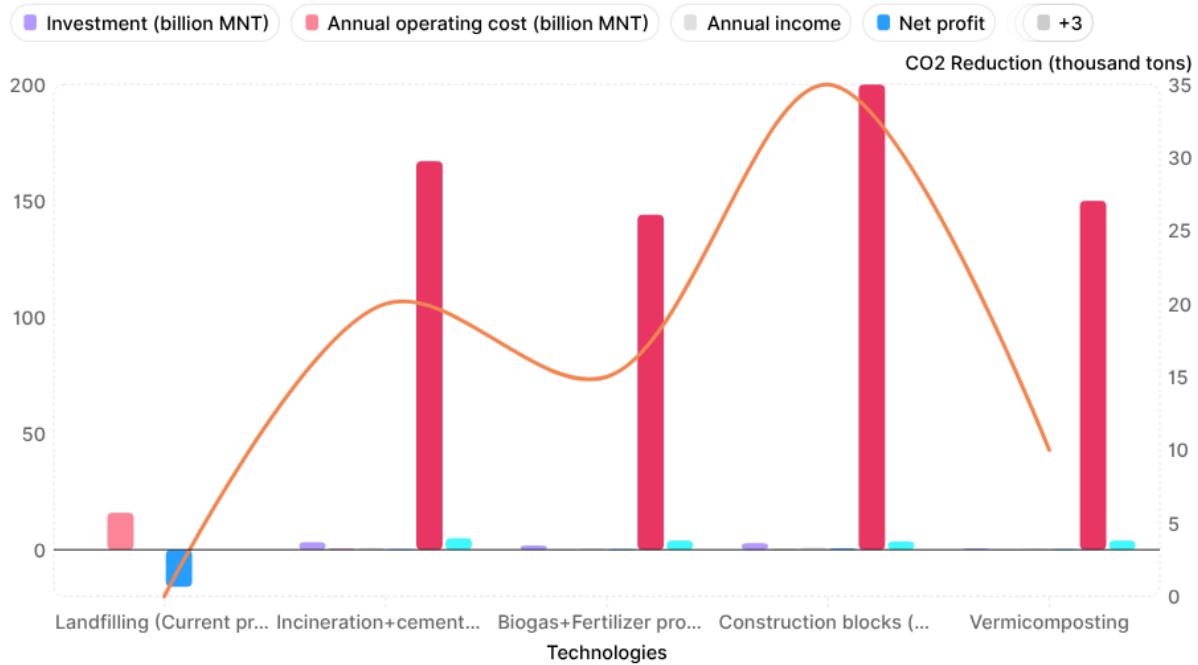


Abbildung 20. Eduktion des Klärschlammvolumens und Wirtschaftsanalyse

### 7.1.7. Integriertes Modell der wirtschaftlichen Gesamtauswirkungen

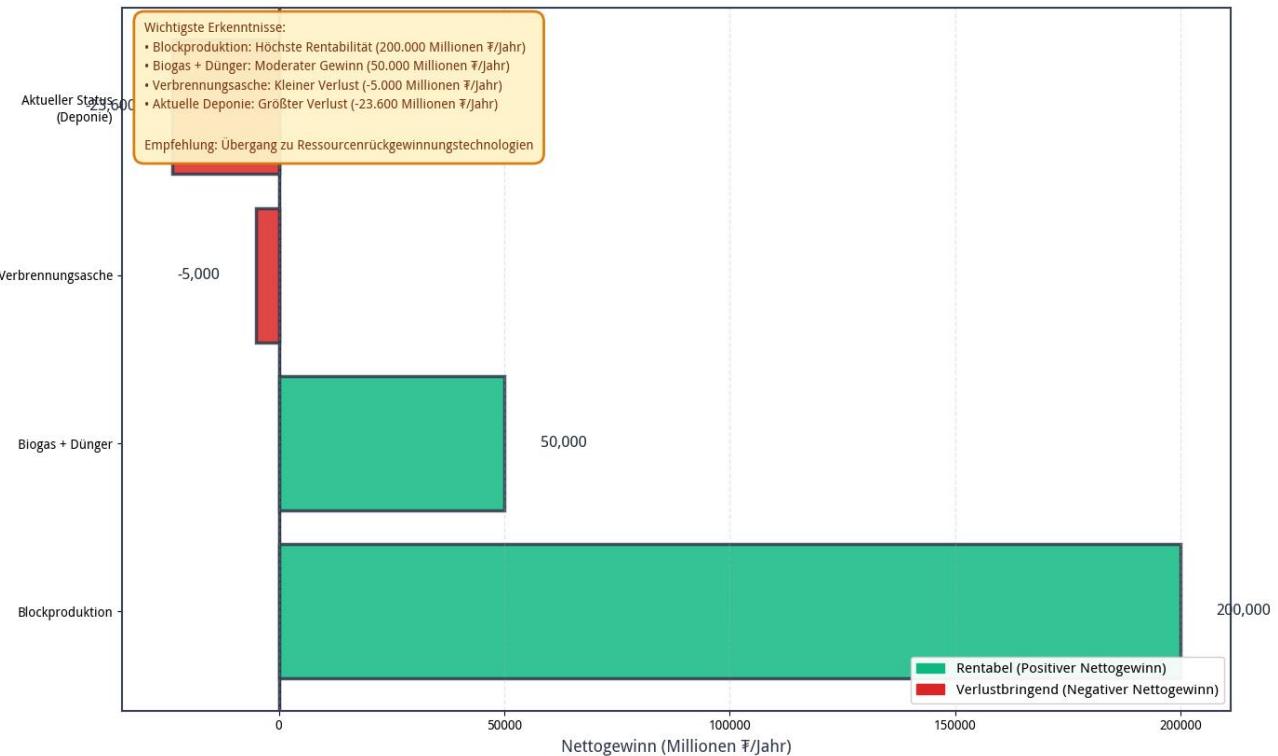
Tabelle 119. Beispiel: Verarbeitung von 100.000 m<sup>3</sup> Klärschlamm

Indikator	Biogasszenario	Bauszenario (Blöcke)
Produktoutput	40 Millionen kWh Energie	30 Millionen Blöcke
Jahreseinnahmen	11,5 Mrd. ₣	18 Mrd. ₣
Betriebskosten	4,5 Mrd. ₣	6 Mrd. ₣
Nettогewinn	7,0 Mrd. ₣/Jahr	12 Mrd. ₣/Jahr
CO <sub>2</sub> -Reduktion	20.000 Tonnen	35.000 Tonnen
CO <sub>2</sub> -Gutschrift (150 USD/Tonne)	3,0 Mrd. ₣	5,3 Mrd. ₣

#### Gesamtwirtschaftlicher Effekt:

Die jährliche Verarbeitung von 100.000 m<sup>3</sup> Klärschlamm kann einen nettoökonomischen Nutzen von 20-25 Milliarden ₣ erzeugen und gleichzeitig eine Reduktion von 30.000-50.000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten gewährleisten.

## Wirtschaftlicher Vergleich der Schlammmanagement-Technologien Jährliche Nettogewinnanalyse



**Abbildung 21. Economic Comparison: Waste or Resource (per 1 m<sup>3</sup> of sludge)**

### 7.1.8. Schlussfolgerung

- Das aktuelle Klärschlammmanagement ist ein kostenorientiertes, nicht nachhaltiges System, das zu einem jährlichen wirtschaftlichen Verlust von 23,6 Mrd. T führt.
- Recyclingtechnologien stellen ein gewinnorientiertes, nachhaltiges System dar und bieten die höchsten wirtschaftlichen Erträge:
  - Baustoffe (ROI  $\approx$  200 %)
  - Biogas + Dünger (ROI  $\approx$  167 %)
- Selbst bei Berücksichtigung sozialer und ökologischer Externalitäten bleibt Klärschlammrecycling wirtschaftlich vorteilhaft.
- Die Wahrnehmung von Klärschlamm muss sich von „Abfall“ zu „Ressource“ verändern, um seine Nutzung als Rohstoff für Energie, Baustoffe und organische Dünger zu ermöglichen.

## 7.2. Marktchancen in der Mongolei und Exportpotenzial

### 7.2.1. Allgemeiner Marktkontext

Die Mongolei erzeugt jährlich 400-450 Tausend m<sup>3</sup> Klärschlamm, wovon 80% aus Ulaanbaatar stammen. Dies stellt eine stabile Rohstoffbasis für Schlammrecyclingindustrien dar. Gleichzeitig steigt die Nachfrage im Zuge der nationalen grünen Transformation, insbesondere in folgenden Sektoren:

**Tabelle 120. Treiber der grünen Marktnachfrage**

Sektor	Wachstumstrend	Relevanz für schlamm-basierte Produkte
Bauwirtschaft	8-10 % jährliches Wachstum	Zement, Blöcke, Zuschlagstoffe
Landwirtschaft	Steigende Nachfrage nach Bodenverbesserern und Düngern	Organische Dünger, Bodenverbesserer
Energie	Ziel: 30 % erneuerbare Energie bis 2030	Biogas, Wärmeenergie
Bergbau & Renaturierung	>2.500 ha Rekultivierungsbedarf	Kompost, Bodenverbesserer, Phytosanierung

Schlamm-basierte Produkte können direkt in die Lieferketten aller vier Schlüsselsektoren integriert werden.

### 7.2.2. Inländische Marktchancen

#### A. Markt für Baumaterialien

Die Bauwirtschaft der Mongolei umfasst einen Jahresmarkt von **2,5-3,0 Billionen ₮**, mit erheblicher Abhängigkeit von importiertem Zement und Blöcken.

**Tabelle 121. Marktindikatoren für Baustoffe**

Produkt	Jahresbedarf	Stück-/Tonnepreis	Substitutionspotenzial durch Schlamm
Zement	2 Mio. t	260.000 ₮/t	10-15 % Ascheanteil
Leichtbaublöcke	120 Mio. Stück	1.000 ₮/Stk	5-10 % Schlammzugabe
Pflasterplatten	8-10 Mio. m <sup>2</sup>	18.000 ₮/m <sup>2</sup>	15-20 % Schlammanteil

Wirtschaftlicher Nutzen: 10 % Zementersatz durch Schlamm-Asche = Einsparung von ca. 50 Mrd. ₮/Jahr

#### B. Markt für Düngemittel und Bodenverbesserer

Die Mongolei benötigt jährlich etwa 250.000 Tonnen Dünger, doch die Inlandsproduktion deckt weniger als 10 % des Bedarfs. Kompost, Wurmkompost und Gärreste auf Basis von Klärschlamm bieten ein reales Potenzial zur Substitution von Importen.

**Tabelle 122. Marktchancen im Düngemittelsektor**

Produkt	Jahresbedarf (t)	Preis (₦/kg)	Marktvolumen
Organischer Dünger	250.000	300-500	75-125 Mrd. ₮
Bodenverbesserer	120.000	200	24 Mrd. ₮
Vermikompost	15.000	600	9 Mrd. ₮

Im Bergbau kann Schlammkompost die Rekultivierungskosten um **20-30 %** senken.

#### C. Energiemarkt (Biogas)

Aus jeder Tonne Trockenschlamm: 20–35 m<sup>3</sup> Biogas → 20–25 kWh Strom oder 80–100 MJ Wärme

**Tabelle 123. Wirtschaftliche Bewertung von Biogas**

Indikator	Wert
1 m <sup>3</sup> Schlamm → 3,5 kWh Strom	1.050 ₮ Einnahmen
100.000 m <sup>3</sup> → 350.000 kWh	105 Mio. ₮/Jahr
CO <sub>2</sub> -Reduktion	20.000 t/Jahr
Nutzung	Stromnetz, Fernwärme, Gewächshäuser

### 7.2.3. Exportchancen

Die Mongolei kann Klärschlammprodukte in drei Hauptkategorien exportieren:

#### 1. Kohlenstoffzertifikate

Biogas reduziert Methanemissionen deutlich:

- 1 t CH<sub>4</sub> = 25 t CO<sub>2</sub>-eq
- 10.000 t CH<sub>4</sub>-Reduktion = 250.000 t CO<sub>2</sub>-eq

#### Potenzielle Einnahmen:

250.000 × 150 \$ = 37,5 Mio. USD ≈ 135 Mrd. ₮/Jahr

#### Berechtigung für:

- UNFCCC CDM
- Freiwillige Kohlenstoffmärkte

#### 2. Exportierbare Spezialprodukte

**Tabelle 124. Exportfähige Produkte aus Schlammverwertung**

Produkt	Zielmarkt	Preis	Potenzial
Struvit (MgNH <sub>4</sub> PO <sub>4</sub> )	EU, Korea	800-1.000 \$/t	Hochwertiger Phosphatdünger
Aktivierte Biokohle	Japan, Deutschland	600-900 \$/t	Bodenverbesserer aus Asche
Eco-Block	China, Kasachstan	80-100 \$/m <sup>3</sup>	Grüner Baustoffexport

Struvit-Potenzial: 100.000 Tonnen Klärschlamm aus Ulaanbaatar → 1.200–1.500 Tonnen Struvit → 1,2–1,5 Millionen USD jährlicher Exporterlös.

#### 3. Hauprisiken und politische Lösungen

**Tabelle 125. Risiken und Minderungsmaßnahmen**

Risiko	Auswirkung	Lösung
Verbrauchermisstrauen	Schwierige Vermarktung	“Green Label Certification“
Investitionsmangel	Hohe CAPEX	Grüne Steueranreize, PPP
Schwache Standards	Keine MNS-Normen	EU 86/278/EWG angelichen
Exportzertifikate	Konformitätsprüfung nötig	“Eco Product Certification“

#### 7.2.4. Kombinierte Marktanalyse

**Tabelle 126. Geschätzte Marktgröße**

Segment	Marktgröße/Jahr	Potenzieller Gewinn
Baustoffe	150-200 Mrd. ₮	30-40 Mrd. ₮
Landwirtschaft/Dünger	75-100 Mrd. ₮	20-25 Mrd. ₮
Biogasenergie	15-20 Mrd. ₮	8-10 Mrd. ₮
CO <sub>2</sub> -Zertifikate	135 Mrd. ₮	60-80 Mrd. ₮
Gesamt	<b>400-450 Mrd. ₮/Jahr</b>	<b>≈150 Mrd. ₮ Gewinn</b>

#### 7.2.5. Schlussfolgerung

##### 1. Inländische Nachfrage:

- Hohe Nachfrage in Bau, Landwirtschaft und Energie
- Steigender Bedarf an Düngern und Rekultivierungsmaterialien

##### 2. Exportmarkt:

- Struvit, Biochar und CO<sub>2</sub>-Zertifikate bieten großes Potenzial
3. **Ökonomisches Potenzial:**
- Schlammrecycling kann **bis zu 150 Mrd. ₮ Jahresumsatz** erzielen
4. **Politische Empfehlungen:**
- Nationales Programm zur Ressourcennutzung von Klärschlamm
  - Steueranreize für grüne Technologien
  - Aktualisierung der MNS-Standards
  - Exportzertifizierung für Schlammprodukte unterstützen

## 7.3. Regionale Logistik, Infrastruktur und Kostenoptimierung

### 7.3.1. Allgemeiner Hintergrund

Der Erfolg von Projekten zur Wiederverwertung von Klärschlamm hängt nicht nur von technologischen Lösungen ab, sondern in hohem Maße auch von Logistik, Transport, Lagerung und einer gut abgestimmten Infrastruktur. In der Mongolei befinden sich die Kläranlagen (Abwasserbehandlungsanlage) 50-600 km von den nächstgelegenen potenziellen Verarbeitungsanlagen entfernt. Daher machen Transportkosten 25-40% der gesamten Betriebskosten aus

### 7.3.2. Kostenstruktur des Klärschlammtransports

Der durchschnittliche Transportkostenaufwand eines **10-m<sup>3</sup>-Tankwagens** stellt sich wie folgt dar:

**Tabelle 127. Einheitlicher Transportkostenaufwand für Klärschlamm**

Kostenkomponente	Berechnungsgrundlage	Stückkosten (ℳ/m <sup>3</sup> ·km)
Kraftstoffverbrauch	$35 \text{ L}/100 \text{ km} \times 3.500 \text{ ℳ/L} \div 10 \text{ m}^3$	12,3 ℳ
Arbeitskosten	$180.000 \text{ ℳ/Tag} \div 250 \text{ km Route}$	7,2 ℳ
Abschreibung & Wartung	Standardamortisation	25,0 ℳ
Gesamtkosten	-	$\approx 45 \text{ ℳ/m}^3 \cdot \text{km}$

Für 100 km Transport:

$$100 \text{ km} \times 45 \text{ ℳ/m}^3 \cdot \text{km} = 4.500 \text{ ℳ/m}^3$$

Wenn täglich 1.000 m<sup>3</sup> transportiert werden:

$$4,5 \text{ Mio. ℳ/Tag} = \sim 1,64 \text{ Mrd. ℳ/Jahr}$$

**Transportkosten sind der größte Kostenblock** im Schlammmanagement. Eine optimale Standortwahl kann erhebliche Einsparungen bringen.

### 7.3.3. Optimierung der Standortwahl

Die Standorte von Schlammbearbeitungsanlagen sollten nach fünf ingenieurtechnischen Kriterien ausgewählt werden:

- Transportdistanz
- Marktnähe
- Stromversorgung
- Wasserverfügbarkeit
- Infrastrukturanschluss

**Tabelle 128. Kriterien der Standortauswahl**

Kriterium	Beispiel	Optimale Bewertung (1-5)
Transportentfernung	0-500 m	5
Stromversorgung	Anbindung an Stromnetz	4

<b>Boden/Hydrogeologie</b>	Gering durchlässiger Lehmboden	4
<b>Straßenanbindung</b>	Asphaltstraße	5
<b>Marktnähe</b>	Innerhalb 10 km	4
<b>Gesamtpunktzahl</b>	-	<b>22/25 (optimal)</b>

## A. Zentrales Verarbeitungsmodell

- Standorte: **Ulaanbaatar, Darkhan**
- Kapazität: **50-100 m<sup>3</sup>/Tag**
- Technologien: **Verbrennung, WtE, Asche-zu-Zement**
- Transportradius: **10-15 km**
- Transportkosten: **2.000-3.000 ₮/m<sup>3</sup>**

**Vorteile:** Starke Infrastruktur, zuverlässige Stromversorgung, Nähe zu Verbrauchern

**Nachteile:** Hohe Investitionskosten, städtische Belastung

## B. Lokale modulare Systeme

- Standorte: Aimags, Soum-Kläranlagen
- Technologien: Kompostierung, Biogas, Vermikompostierung
- Kapazität: 5-10 m<sup>3</sup>/Tag
- Transportradius: 1-3 km
- Transportkosten: 300-500 ₮/m<sup>3</sup>

**Vorteile:** Sehr niedrige Transportkosten, geeignet für lokalen Bedarf

**Nachteile:** Geringeres Produktionsvolumen, Qualitätskontrolle erforderlich

### 7.3.4. Technisches Layout für bestehende Kläranlagen

Ein Standard-Schlammverarbeitungszentrum umfasst:

1. Entnahmepunkt für Klärschlamm
2. Pumpstation
3. Trocknungseinheit
4. Verbrennungs-/Biogasreaktor
5. Aschelager & Produktversandbereich

Ein Standort in 240-500 m Entfernung zur Kläranlage spart jährlich bis zu 1,5 Mrd. ₮ an Transportkosten.

### 7.3.5. Dreistufiges integriertes Logistiksystem

**Tabelle 129. Mongolisches Drei-Ebenen-Logistiksystem**

Ebene	Standort	Funktion
Tier I - Zentralhub	Ulaanbaatar	Verbrennung, Zementasche, WtE
Tier II - Regionale Zentren	Darkhan, Erdenet, Umnugovi	Biogas + Kompost
Tier III - Lokale Einheiten	Soum-Zentren (Matad, Tosontsengel, Tsetserleg usw.)	Vermikompostierung, Bodenrehabilitierung

#### Logik:

- Zentralhub sammelt Schlamm im 100-150-km-Radius
  - Regionale Zentren bedienen mittlere Mengen
  - Lokale Systeme übernehmen dezentrale Behandlung
- 30-40 % nationale Logistikkosteneinsparung**

### 7.3.6. Kostenoptimierung bei der Standortwahl

**Tabelle 130. Wirtschaftlicher Vergleich von drei Standortoptionen**

Option	Transportdistanz	Transportkosten (₹/m³)	Trocknung/Sto <sup>r</sup> age (₹/m³)	Gesamt (₹/m³)	Kostendifferenz
<b>Ferntransport (50 km)</b>	50 km	2.250	5.000	7.250	Basis
<b>Zentralisiert (5 km)</b>	5 km	225	5.000	5.225	-28%
<b>Direkt am ABWASSERBEHANDLUNGSA<sup>N</sup>LAGE (0,25 km)</b>	0,25 km	11	5.000	5.011	-31%

Vorteil: Der Bau der Klärschlammverarbeitungsanlage direkt neben der Kläranlage spart jährlich bis zu 3 Milliarden ₹ an Transportkosten.

### 7.3.7. Empfohlene Infrastrukturverbesserungen

**Tabelle 131. Infrastrukturmaßnahmen**

Lösung	Ziel	Erwartetes Ergebnis
<b>Schlamm-Pipeline</b>	LKW-Transport ersetzen	80 % geringere Transportkosten
<b>Modulare Solartrocknungsfelder</b>	Trocknungskosten senken	40 % weniger Energie
<b>GPS-Transporttracking</b>	Echtzeitkontrolle	Zuverlässigkeit ↑, Verluste ↓
<b>Sekundärproduktlager</b>	Lagerung von Asche, Dünger, Blöcken	Lieferkette effizienter

### 7.3.8. Schlussfolgerungen und strategische Empfehlungen

- Standortoptimierung: Anlagen neben ABWASSERBEHANDLUNGSANLAGEN → 30-40 % geringere Logistikkosten
- Infrastrukturausbau: Aufbau eines integrierten “Schlamm-Energie-Baustoffe“-Industriezentrums
- Lokale Lösungen: Aimag-Module → 70 % geringere Transportkosten
- Dreistufiges nationales System:
  - **Tier I:** Ulaanbaatar → WtE + Zementadditive
  - **Tier II:** Regionale Zentren → Biogas + Kompost
  - **Tier III:** Soum-Zentren → Kompost + Vermikompost

Ein landesweites dreistufiges Klärschlamm-Logistiksystem ist die optimale und wirtschaftlich nachhaltigste Lösung für die Mongolei.

## 7.4. Niedrigkosten-Technologieoptionen und lokale Umsetzungsmodelle

### 7.4.1. Ziel und Begründung

In Aimags und Soum-Zentren fällt typischerweise nur 5-20 m<sup>3</sup>/Tag an Klärschlamm an. Für diese geringen Mengen sind großtechnische oder hochautomatisierte Anlagen wirtschaftlich nicht tragfähig. Daher werden kostengünstige, wartungsarme und modulare Technologien benötigt, die an lokale klimatische Bedingungen, vorhandene Infrastruktur und verfügbare Arbeitskräfte angepasst sind.

**Tabelle 132. Haupttechnologieoptionen**

Technologie	Grundprinzip	Kapazität	Vorteile	Investitionskosten
A. Solartrocknungsbett	Verteilung des Schlammes (10-15 cm) auf einer wasserdichten	5-20 m <sup>3</sup> /Tag	Kein Energiebedarf;	80-100 Mio. ₹

	Fläche; Trocknung durch Sonne/Wind		einfache Wartung	
B. Aerobe Kompostierung	Mischung von Schlamm mit Pflanzenresten/Holzspänen und aerobe Zersetzung bei ~60°C	5-10 m³/Tag	Pathogene eliminiert; Dünger entsteht	120 Mio. ₮
C. Vermikompostierung (Eisenia fetida)	Vorgetrockneter Schlamm durch Regenwürmer in Bio-Dünger umgewandelt	2-5 m³/Tag	Geringer Energiebedarf; hochwertige Produkte	40-60 Mio. ₮
D. Mini-Biogasreaktor (Mini-AD)	Anaerobe Vergärung zur Gewinnung von Biogas und Dünger	5-15 m³/Tag	Produziert Energie und Dünger	200-250 Mio. ₮

**Tabelle 133. Wirtschaftlicher Vergleich (pro 1 m³ Schlamm)**

Kennzahl	Solartrocknung	Kompostierung	Vermikompostierung	Biogas
Kosten (₩/m³)	15.000	25.000	30.000	45.000
Produktwert (₩/m³)	0	100.000	120.000	110.000
Nettonutzen (₩/m³)	0	+75.000	+90.000	+65.000
Amortisationszeit	2 Jahre	3 Jahre	2-3 Jahre	4-5 Jahre

**Schlussfolgerung:** Für ländliche Gebiete bieten Vermikompostierung und aerobe Kompostierung die höchste Wirtschaftlichkeit bei gleichzeitig niedrigen Risiken und geringen Investitionskosten.

#### 7.4.2. Lokales ingenieurtechnisches Umsetzungsmodell

##### A. “Mini-Sludge-Center“-Modell (für Aimag-/Soum-Ebene)

###### Komponenten:

- 1 ha Betriebsfläche
- 2 Solartrocknungsbetten (je 10 × 20 m)
- 1 Kompostierplatz (15 × 10 m)
- 1 Vermikompostierbereich
- 1 Biogastank (50 m³)
- Lagerhalle, Wiege- und Verpackungsbereich

**Jahreskapazität:** 3.000-4.000 m³ Schlamm

###### Jahresprodukte:

- 1.000 Tonnen Kompost
- 50.000 kWh Biogasenergie

**Gesamtinvestition:** 350 Mio. ₮

**Amortisationszeit:** ≈ 3 Jahre

Dieses Modell ist modular, technisch einfach und ideal für ressourcenarme ländliche Gebiete.

#### 7.4.3. Infrastrukturintegration und gemeinsames Management

###### Eingangsstoffe:

- Schlamm aus lokalen Kläranlagen
- Landwirtschaftliche Reststoffe (Mist, Stroh, Pflanzenabfälle)

## Abnehmer der Produkte:

- Landwirtschaftliche Genossenschaften in Aimags
- Bergbausanierungsunternehmen
- Landschaftsbau- und Baumschuleinrichtungen

## PPP-Modell (Public-Private Partnership)

**Tabelle 134. Rollen und Verantwortlichkeiten**

Akteur	Verantwortlichkeiten
Lokale Regierung / Bürgerrat	Bereitstellung von Land, Wasser, Strom, Straßenanbindung
Privatwirtschaft	Installation, Betrieb, Produktvermarktung
Gewinnverteilung	60:40 (Regierung : Privatsektor)

PPP senkt die Anfangsinvestitionen der öffentlichen Hand und gewährleistet nachhaltigen Betrieb.

## 7.4.4. Soziale und ökologische Vorteile

**Tabelle 135. Erwartete Auswirkungen**

Indikator	Auswirkung
Umwelt-Risikoreduktion	80-90 %
Beschäftigung	8-12 lokale Arbeitsplätze
Treibhausgasreduktion	2.000-3.000 t CO <sub>2</sub> /Jahr
Landrehabilitierung	10-15 ha/Jahr
Soziale Akzeptanz	Hoch (umweltfreundlich, einkommensschaffend)

## Empfehlungen:

1. Kompostierung und Vermikompostierung sind ideal für ländliche Regionen: geringe Risiken, hohe Rendite.
2. 5-10 m<sup>3</sup>/Tag modulare Systeme halten Investitionen bei 100-300 Mio. ₮ und sichern einfachen Betrieb.
3. Lokale Arbeitskräfte, Materialquellen und Absatzmärkte gewährleisten hohe wirtschaftliche Selbstständigkeit.
4. Modell sollte landesweit als “Aimag-Level Green Sludge Recycling Initiative“ skaliert werden.

## 7.5. Finanzmodellierung (NPV, IRR, ROI)

### 7.5.1. Ziel der Finanzmodellierung

Zur Bewertung der wirtschaftlichen Tragfähigkeit und langfristigen finanziellen Nachhaltigkeit von Technologien zur Klärschlammwertung wurden über einen Zeitraum von 10 Jahren die folgenden Kennzahlen modelliert:

- NPV - Net Present Value
- IRR - Internal Rate of Return
- ROI - Return on Investment
- Amortisationszeit

## Grundannahmen:

- Verarbeitungskapazität: **100.000 t/Jahr (Trockenschlamm)**
- Diskontsatz  $r$ : **10 %**

- Projektlaufzeit: **10 Jahre**
- Nettogewinnmarge nach Steuern: **15 %**
- Währung: **Euro (€)**

Diese Kennzahlen ermöglichen einen fundierten Vergleich der wirtschaftlichen Performance verschiedener Technologien.

### 7.5.2. Zentrale Finanzformeln

#### 1. Net Present Value (NPV)

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - C_0$$

- $CF_t$  - Cashflow im Jahr  $t$
- $r$  – Diskontsatz
- $n$  - Anzahl der Jahre
- $C_0$  - Anfangsinvestition

#### Interpretation:

- $NPV > 0$ : Projekt ist finanziell rentabel
- $NPV < 0$ : Projekt vernichtet Wert
- $NPV = 0$ : Break-even-Punkt (Weder Gewinn noch Verlust)

#### 2. Entscheidungsregel für den IRR:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - C_0$$

#### Entscheidungsregel für den IRR:

- $IRR > r$ : Das Projekt wird angenommen
- $IRR < r$ : Das Projekt wird abgelehnt

#### 3. Kapitalertragsrate (ROI)

$$ROI = \frac{\sum (Revenue - Cost)}{C_0} \times 100$$

#### Amortisationszeit (PP):

$$PP = \frac{Initial\ Investment}{Annual\ Net\ Cash\ Flow}$$

#### Erläuterung:

Die Amortisationszeit (PP) gibt an, wie viele Jahre erforderlich sind, bis ein Projekt seine anfängliche Investition wieder eingespielt hat.

Eine kürzere Amortisationszeit bedeutet, dass sich die Investition schneller amortisiert und das Projekt ein geringeres finanzielles Risiko aufweist.

### 7.5.3. Vergleichende wirtschaftliche Bewertung der Technologieoptionen

Tabelle 136. Finanzielle Bewertung der Technologieszenarien (10-Jahres-Modell)

Indikator	Bausteine	Biogas + Dünger	Verbrennung + Energie (WtE)	Kompost / Landrehabilitierung
CAPEX (Mio. €)	5.0-8.0	8.0-12.0	25.0-40.0	1.0-2.0
Jahresumsatz (Mio. €)	3.0	2.0	6.0	0.8
Jährliche OPEX (Mio. €)	1.3	1.2	5.0	0.3
Nettогewinn (Mio. €)	1.7	0.8	1.0	0.5
NPV (10 Jahre, 10%)	+3.8	+1.5	-2.5	+0.8
IRR (%)	22%	15%	8%	18%
ROI (10 Jahre)	180%	120%	60%	250%
Amortisationszeit	3-4 Jahre	4-6 Jahre	8-12 Jahre	2-3 Jahre

#### Interpretation:

- ✓ Die Optionen “Bausteine“, “Biogas + Dünger“ und “Kompost“ sind wirtschaftlich attraktiv.
- ✗ Die Verbrennung (WtE) ist unter den aktuellen Kostenstrukturen finanziell nicht vorteilhaft.

### 7.5.4. Cashflow-Modellierung

#### A. Projekt: Biogas + Dünger

Tabelle 137. Cashflow-Modell

Jahr	Umsatz (€M)	Kosten (€M)	Netto-Cashflow (€M)	Diskonfaktor (10%)	Barwert (€M)
0	-	-8.0	-8.0	1.00	-8.00
1	1.5	1.2	0.3	0.91	0.27
2	2.0	1.3	0.7	0.83	0.58
3	2.5	1.3	1.2	0.75	0.90
4	2.5	1.3	1.2	0.68	0.81
5	2.5	1.3	1.2	0.62	0.74
6-10	2.5	1.4	1.1	-	3.10
Gesamt-NPV	-	-	-	-	+1.5

#### Ergebnisse:

- NPV = +1.5 Mio. €
- IRR = 15.2 %
- ROI = 120 %
- Amortisationszeit = 4 Jahre

#### B. Projekt: Bausteinproduktion

Tabelle 138. Cashflow-Modell

Jahr	Umsatz (€M)	Kosten (€M)	Netto-Cashflow (€M)	Barwert (€M)
0	-	-5.0	-5.0	-5.00
1	2.0	1.0	1.0	0.91
2	2.5	1.1	1.4	1.16
3	2.8	1.2	1.6	1.20
4	3.0	1.2	1.8	1.23
5	3.0	1.3	1.7	1.05
6-10	3.0	1.3	1.7	3.15
Gesamt-NPV	-	-	-	+3.8

## Ergebnisse:

- NPV = +3.8 Mio. €
- IRR = 22 %
- ROI = 180 %
- Amortisationszeit = 3 Jahre

### 7.5.5. Sensitivitätsanalyse

Tabelle 139. Sensitivität zentraler Variablen

Variable	+20% Änderung	-20% Änderung	Sensitivität
Umsatz	NPV +35%	NPV -40%	Hoch
Kosten	NPV -15%	NPV +12%	Mittel
Diskontsatz	8% → NPV +18%	12% → NPV -20%	Hoch
CAPEX	NPV -10%	NPV +8%	Niedrig

**Schlussfolgerung:** Die finanziellen Erträge reagieren am empfindlichsten auf Produktpreise und den Diskontsatz. Mechanismen zur Einnahmensicherung sind unerlässlich.

### 7.5.6. Kombinierte wirtschaftliche Auswirkungen

Tabelle 140. Jährliche wirtschaftliche Effekte

Indikator	Bausteine	Biogas	Kompost
Jahresumsatz	18 Mrd. ₮	11 Mrd. ₮	6 Mrd. ₮
Nettогewinn	12 Mrd. ₮	7 Mrd. ₮	4 Mrd. ₮
Amortisation	3 Jahre	4 Jahre	2 Jahre
CO <sub>2</sub> -Reduktion	35,000 t	20,000 t	10,000 t
Arbeitsplätze	50	35	20

### 7.5.7. Finanzpolitische Empfehlungen

1. Bereitstellung von zinsgünstigen 5-10-Jahres-Krediten über den Green Fund
2. Nutzung von Erlösen aus CO<sub>2</sub>-Zertifikaten zur Kreditrückzahlung
3. Förderung von PPP- & Konzessionsmodellen für Bau und Betrieb
4. Einrichtung eines Green Credit Guarantee Scheme für Banken

### 7.5.8. Abschließende Gesamtbewertung

- Alle modellierten Technologien zeigen **positiven NPV** und **IRR > 10 %** → hohe Investitionsattraktivität
- Jährlicher potenzieller Nutzen:
  - **20-25 Mrd. ₮** wirtschaftlicher Gesamteffekt
  - **30,000-50,000 t CO<sub>2</sub>-Reduktion**
  - **100-150 neue Arbeitsplätze**
- Das Klärschlammrecycling führt die Mongolei von einem kostenorientierten System zu einer wertschöpfenden Kreislaufwirtschaft.

# Financial Analysis of Sludge Treatment Investment Options

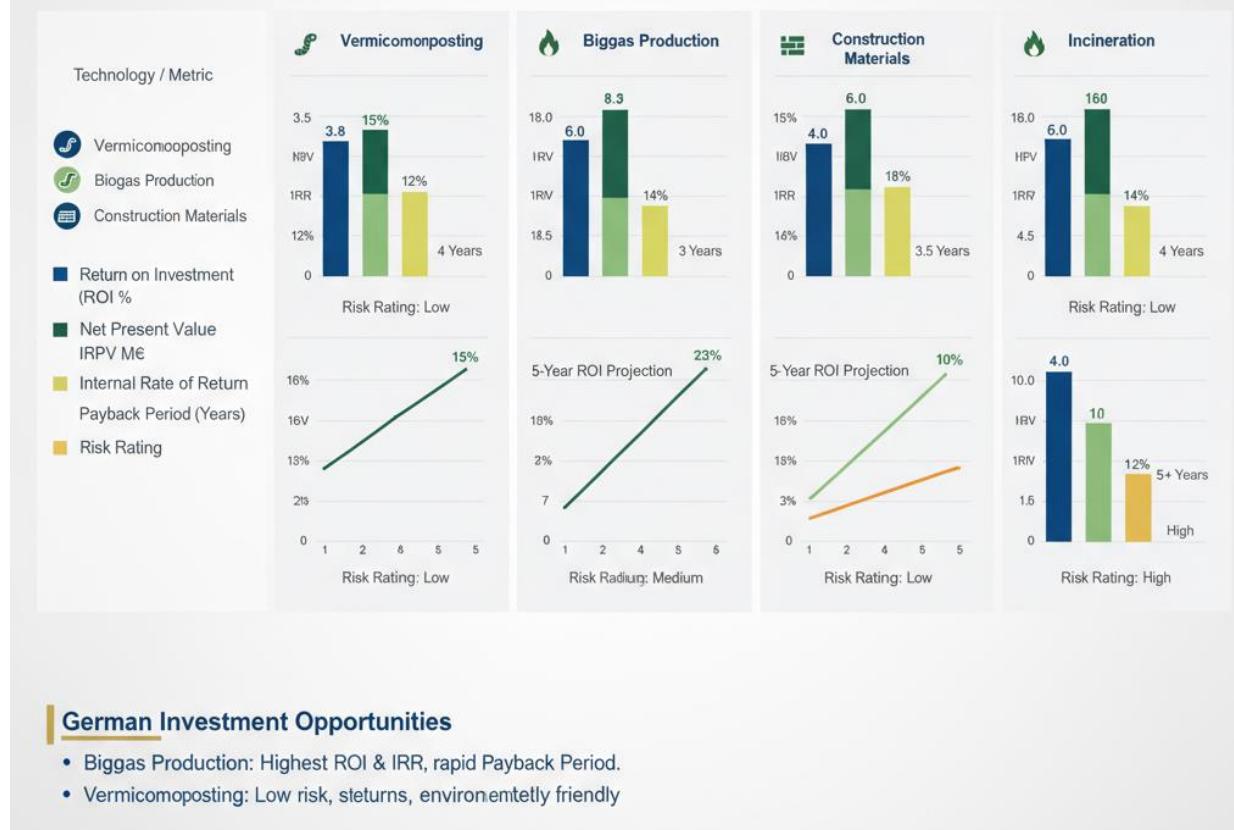


Abbildung 22. Finanzanalyse der Investitionsoptionen für Schlammbehandlungstechnologien

## VIII. POLITISCHE EMPFEHLUNGEN UND STRATEGISCHER UMSETZUNGSRAHMEN

### 8.1. Übergeordnetes Ziel

Das zentrale Ziel dieser Strategie besteht darin, das Konzept von kommunalem Abwasserschlamm als wirtschaftliche und ökologische Ressource - und nicht als Abfall - in die nationalen Politiken und Planungsrahmen der Mongolei zu integrieren. Die Umsetzung eines *One-Health-Ansatzes* im Schlammmmanagement erfordert eine koordinierte Zusammenarbeit in den Bereichen:

- Umweltschutz
- Öffentliche Gesundheit
- Wirtschaftliche Effizienz
- Nachhaltige Produktion

Ein umfassender nationaler Politik- und Rechtsrahmen muss geschaffen werden, um ein synergetisches Zusammenspiel dieser Bereiche sicherzustellen.

### 8.2. Aktueller Rechts- und Regulierungsrahmen

Tabelle 141. Bestehende Gesetze, Standards und deren Abdeckung

Politisches Dokument	Geltungsbereich	Bezug zum Schlammmangement
<b>Wasserrecht (2012)</b>	Wassernutzung, Verschmutzungskontrolle	Keine expliziten Bestimmungen zur Schlammerhöhung
<b>Abfallwirtschaftsgesetz (2017)</b>	Klassifizierung und Management von Abfällen	Schlamm als "gefährlicher Abfall" eingestuft → Wiederverwendung eingeschränkt
<b>Umweltgesetz (2012)</b>	Allgemeiner Rahmen	Keine Vorgaben zu Ökotoxizität oder biologischen Risiken
<b>MNS 5850:2019</b>	Schlammqualität, Klassifizierung	Unvollständig - Parameter zu Pathogenen und Sickerwasser fehlen
<b>MNS 7003:2023</b>	Anforderungen für Landrehabilitierung	Fehlende technische Leitlinien

**Schlussfolgerung:** Der Mongolei fehlen eine einheitliche Politik, Standards und ein Überwachungssystem für die Wiederverwendung und Verarbeitung von Klärschlamm. → Eine nationale Strategie für das Klärschlammmanagement und aktualisierte MNS-Standards sind erforderlich.

### 8.3. Nationale Politikziele (2025-2035)

Tabelle 142. "Nationales Programm zur Nutzung von Schlammmressourcen" (2025-2035)

Ziel	Indikator	Zielniveau
<b>50 % des Schlamms recyceln</b>	Recyclinganteil	50 % bis 2030; 80 % bis 2035
<b>Umweltrisiken reduzieren</b>	Ökotoxikologie-Index	60 % Reduktion
<b>Energieeffizienz erhöhen</b>	Biogas, WtE	10 MW installierte Kapazität
<b>Schlamm als Bodenverbesserer</b>	In der Landwirtschaft eingesetzter Schlamm	50.000 t/Jahr
<b>Grüne Arbeitsplätze</b>	Beschäftigung	>1.000 dauerhafte Arbeitsplätze

## 8.4. Strategische Ausrichtungen

**Tabelle 143. Institutioneller Rahmen**

Maßnahme	Begründung
Nationaler Rat für Schlammmmanagement	Sektorübergreifende Koordination (MoET, MoH, MoFALI, MoE, Stadtverwaltung, Privatsektor)
Nationales Schlamm-Informationssystem (Sludge Data Hub)	Zentrale Datenerfassung zu Schlammanfall, Zusammensetzung, Verarbeitung und Wiederverwendung
Schulungs- und Technikzentrum	Kapazitätsaufbau für Techniker, Ingenieure, Biotechnologen und Laborfachkräfte

**Tabelle 144. Politik zur Technologieentwicklung**

Technologiegebiet	Umsetzungsansatz
Kompostierung & Vermikompostierung	Kleinsysteme in Provinzen und Soums (10-20 Einheiten/Jahr)
Biogas- & WtE-Anlagen	Großanlagen an zentralen KAAs (Ulaanbaatar, Darkhan, Erdenet)
Baustoffe	Standards für Schlam-Asche in Zement und Blöcken einführen
Kreislaufwirtschaftskomplexe	Integration von Energie, Dünger und Baumaterialien

**Tabelle 145. Wirtschafts- und Finanzierungsmaßnahmen**

Instrument	Beschreibung
Green Loan Program	5-10-jährige zinsgünstige Kredite für Schlammprojekte
Carbon Credit Scheme	Monetarisierung der CH <sub>4</sub> -Reduktion durch Biogas/WtE
PPP-Partnerschaften	Öffentlich-private Entwicklung von Schlammverarbeitungsanlagen
Steueranreize	Steuererleichterungen für schlammderivierte Baustoffe und Dünger

**Tabelle 146. Reform der Standards und Überwachung**

Vorgeschlagene neue Standards:

Standard	Schlüsselindikatoren
MNS xxxx:2025 - Qualität behandelter Schlämme	Pathogene, Schwermetalle, organische Schadstoffe, Biotoxizität
MNS xxxx:2025 - Sichere Wiederverwendung	Landwirtschaft, Rekultivierung, Bauanwendungen
MNS xxxx:2025 - Sickerwassertests	TCLP- und SPLP-Methoden

**Umwelt- und Gesundheitsüberwachung:**

- Einführung von One-Health-Indikatoren: ARB/AMR, Pathogene, Schwermetalle, Boden-Wasser-Wirkungen
- Obligatorische Überwachung zweimal jährlich (chemisch, mikrobiologisch, ökotoxikologisch)
- Einschränkungsregel: Wiederverwendung verboten, wenn Ökotoxizitätsindex  $\geq 0.7$

## 8.5. Umsetzungsfahrplan (2025-2035)

**Tabelle 147. Phasenplan**

Phase	Maßnahmen
Phase I (2025-2027) - Kurzfristig	Standardreform, 3 Pilotanlagen, Aufbau der nationalen Datenbank
Phase II (2028-2030) - Mittelfristig	Aufbau modularer Behandlungszentren in jeder Provinz (20-25 Einheiten)
Phase III (2031-2035) - Langfristig	Erreichen einer nationalen Schlammmrecyclingquote von 80 %

## 8.6. Risikomanagement-Rahmen

Tabelle 148. Maßnahmen zum Risikomanagement

Risiko	Auswirkung	Gegenmaßnahmen
Unzureichende Investitionen	Projektverzögerungen	Green Investment Fund, internationale Partner
Technologische Ausfälle	Produktionsstillstand	Schulungen, zentrale Ersatzteilversorgung
Soziale Ablehnung	Geringe Akzeptanz	Öffentlichkeitsarbeit und Transparenz
Schwache Umweltüberwachung	Sekundäre Kontamination	Stärkung von Laboren und Aufsichtssystemen

## 8.7. Erwartete sozioökonomische Ergebnisse

Tabelle 149. Erwartete Ergebnisse (2025-2035)

Indikator	2030	2035
Schlammrecycling	50 %	80 %
CO <sub>2</sub> -Reduktion	30.000 t CO <sub>2</sub> -eq	55.000 t CO <sub>2</sub> -eq
Beschäftigung	500 Arbeitsplätze	1.000 Arbeitsplätze
Inländischer Produktionswert	150 Mrd. MNT	400 Mrd. MNT
Exporteinnahmen	5 Mio. USD	20 Mio. USD

## 8.8. Gesamtschlussfolgerung und Empfehlungen

Die Mongolei verfügt über erhebliches Potenzial, kommunalen Abwasserschlamm in einen wirtschaftlichen Wertstoff und einen Motor der Kreislaufwirtschaft zu verwandeln.

### Wesentliche Vorteile:

- Wirtschaftlich:** bis zu 150 Mrd. MNT jährlicher Mehrwert
- Ökologisch:** 80 % Schlammverwertung → 50.000 t CO<sub>2</sub>-eq weniger pro Jahr
- Gesundheitlich:** Reduzierter ARB/AMR- und Pathogengehalt
- Sozial:** >1.000 neue grüne Arbeitsplätze bis 2035

**Voraussetzung:** starke Kooperation zwischen Staat, Privatsektor, Forschung, lokalen Behörden und Öffentlichkeit.

## 8.9. Zeitplan der politischen Umsetzung (Abbildungsbescriftung)

Programmlaufzeit: 2025-2035

**Übergeordnetes Ziel:** Aufbau eines nationalen Systems zur Wiederverwertung von 80 % des Abwasserschlammes.

Diese Abbildung zeigt den 10-jährigen, phasenweisen Implementierungsplan mit allen wichtigen Meilensteinen.

Tabelle 150. Umsetzungszeitplan (2025-2035)

Aktivität	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Phase I (2025-2027): Grundlegender Aufbau											
Reform des Regelwerks (MNS-Standards)	█	█									
Einrichtung von 3 Pilotanlagen (UB, Darkhan, Erdenet)	█	█	█								

Nationales Daten- und Informationssystem	██████████	██████████	████									
Phase II (2028-2030): Regionale Ausweitung												
Modulare Systeme in allen Provinzen (20-25 Stationen)			████	████	████							
Pilotanlagen für Biogas & Vermikompost		████	████	████								
Umsetzung des PPP-Modells (Public-Private Partnership)		████	████	████								
Phase III (2031-2035): Integriertes nationales System												
Nationales Referenzlabor						████	████					
Nationale Cluster für Energie-Dünger-Baustoffe						████	████	████				
Ausbau des integrierten Monitoring- & Datensystems						████	████	████				
Programmevaluierung und Berichterstattung								████	████	████		

**Hinweis:** Die schattierten Blöcke stellen die Jahre dar, in denen die jeweilige Maßnahme aktiv umgesetzt wird.

- 2025-2027 - Gesetzesreformen, Standards und Pilotanlagen
- 2028-2030 - Regionale Einführung und Investitionsphase
- 2031-2035 - Aufbau eines vollständig integrierten nationalen Systems

## 8.10. Risiko-Bewertungsmatrix

Die Risikobewertung basiert auf 10 Schlüsselfaktoren, die jeweils nach Wahrscheinlichkeit (1-5) und Auswirkung (1-5) bewertet werden.

### Risikostufen:

- **Sehr hoch (15-20):** Sofortige strategische Maßnahmen erforderlich
- **Hoch (10-14):** Engmaschige Beobachtung und Risikominderung notwendig
- **Mittel (6-9):** Standardmäßige Managementmaßnahmen ausreichend
- **Niedrig (1-5):** Akzeptables Risiko

**Tabelle 151. Risiko-Bewertungsmatrix**

Nr.	Risikotyp	Wahrscheinlichkeit (1-5)	Auswirkung (1-5)	Risiko-Score	Minderungsstrategie
1	Investitionsengpässe	4	5	Sehr hoch	Grüne Finanzierung, internationale Fonds, PPP-Modelle
2	Technische Ausfälle oder	3	4	Hoch	Technische Standards,

	Fehlfunktionen				Schulungen, Ersatzteilmanagement
<b>3</b>	Soziale Ablehnung (Geruch, Wahrnehmung)	3	3	Mittel-hoch	Transparenz, Öffentlichkeitsarbeit
<b>4</b>	Sekundäre Umweltkontamination (TCLP-Sickerwasser)	2	5	<b>Hoch</b>	Laborüberwachung, regelmäßige Inspektionen
<b>5</b>	Risiken für die öffentliche Gesundheit (Pathogene, ARB)	3	4	<b>Hoch</b>	Desinfektion, Sterilisation, Gesundheitsüberwachung
<b>6</b>	Marktrisiken (Nachfrage, Absatz)	2	3	Mittel	Grüne Beschaffung, langfristige Verträge
<b>7</b>	Regulatorische Verzögerungen	3	4	<b>Hoch</b>	Arbeitsgruppen für Standardentwicklung, Rechtsreformen
<b>8</b>	Klimatische Einschränkungen (Kälte)	4	2	Mittel	Wärmedämmung, saisonale Anpassung
<b>9</b>	Fachkräftemangel	3	3	Mittel	Schulungs- und Zertifizierungsprogramme
<b>10</b>	Schwaches Projektmanagement	2	4	Mittel	Nationaler Aufsichtsrat, Berichtssystem

## Risikozusammenfassung

- **Drei kritische Risiken (Rotzone):**
  - Unzureichende Finanzierung
  - Verzögerungen bei gesetzlichen Reformen und Standards
  - Technologische und biologische Risiken
- Mittelgroße Risiken: Personalkapazitäten, Marktnachfrage, klimatische Einschränkungen
- Durch geeignete Governance beherrschbar: öffentliche Akzeptanz, Projektdurchführung

## 8.11. Schlussfolgerung

Der Umsetzungszeitplan zeigt, dass die Mongolei innerhalb von 10 Jahren ein vollständig funktionierendes nationales Schlammmanagementsystem aufbauen kann - durch eine gestufte und strategisch abgestimmte Entwicklung.

Die Risikomatrix hebt drei Hauptprioritäten hervor, die starke politische Unterstützung erfordern:

### 1. Nachhaltige Finanzierungsmechanismen

- Grüne Investmentfonds
- Internationale Entwicklungsbanken
- Einnahmen aus Kohlenstoffzertifikaten
- PPP-basierte Finanzierung

### 2. Technologische Zuverlässigkeit

- Aktualisierte MNS-Standards
- Qualifizierte Ingenieure und Laborexperten
- Backup- und Pilotanlagen

### **3. Umwelt- und Gesundheitsschutz**

- ARB/AMR-Überwachung
- Kontrolle von Sickerwasser (TCLP/SPLP)
- Aufbau eines nationalen Referenzlabors

## IX. UMWELTAUSWIRKUNGSBEWERTUNG

### 9.1. Gesamtzielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Umweltverträglichkeitsprüfung besteht darin, die ökologischen Auswirkungen der zentralen und dezentralen Abwasserreinigungsanlagen der Stadt Ulaanbaatar - einschließlich Schlammlagerstätten und Abwasserableitungskanälen - zu bewerten.

Die Bewertung zielt darauf ab, Art, Umfang und Risikoniveau der Umweltbelastungen zu bestimmen sowie notwendige Minderungs- und Managementmaßnahmen abzuleiten. Dabei werden folgende Analysen durchgeführt:

- AERMOD-basierte Modellierung der Geruchsausbreitung
- Indikatoren für Boden-, Wasser- und Luftverschmutzung
- Parameter der Ökosystemdegradation
- Ökologische Risikoabgrenzungen im Einzugsgebiet des Tuul-Flusses
- Zusammengesetzter Umwelt-Risikoindex (ERI)

Diese Studie betrachtet Klärschlamm **nicht als Abfall**, sondern als **umweltrelevantes Material**, das eine wissenschaftlich fundierte, datenbasierte Risikobewertung gemäß internationalen Methodenstandards erfordert.

### Zentrale Bestandteile der Bewertung

1. GIS-basierte Kartierung und räumliche Analyse der Standorte der Kläranlagen
2. Modellierung der Geruchsausbreitung mit AERMOD (USEPA)
3. Laboranalytische Bestimmung von Boden-, Wasser- und Luftbelastungen
4. Bewertung ökologischer und biodiversitätsbezogener Veränderungen
5. Ökologische Risikoabgrenzung entlang des Tuul-Flusses (Pufferzonen 500 m - 1 km - 1,5 km)
6. Berechnung eines integrierten Environmental Risk Index (ERI) und Festlegung von Schutz- und Managementzonen

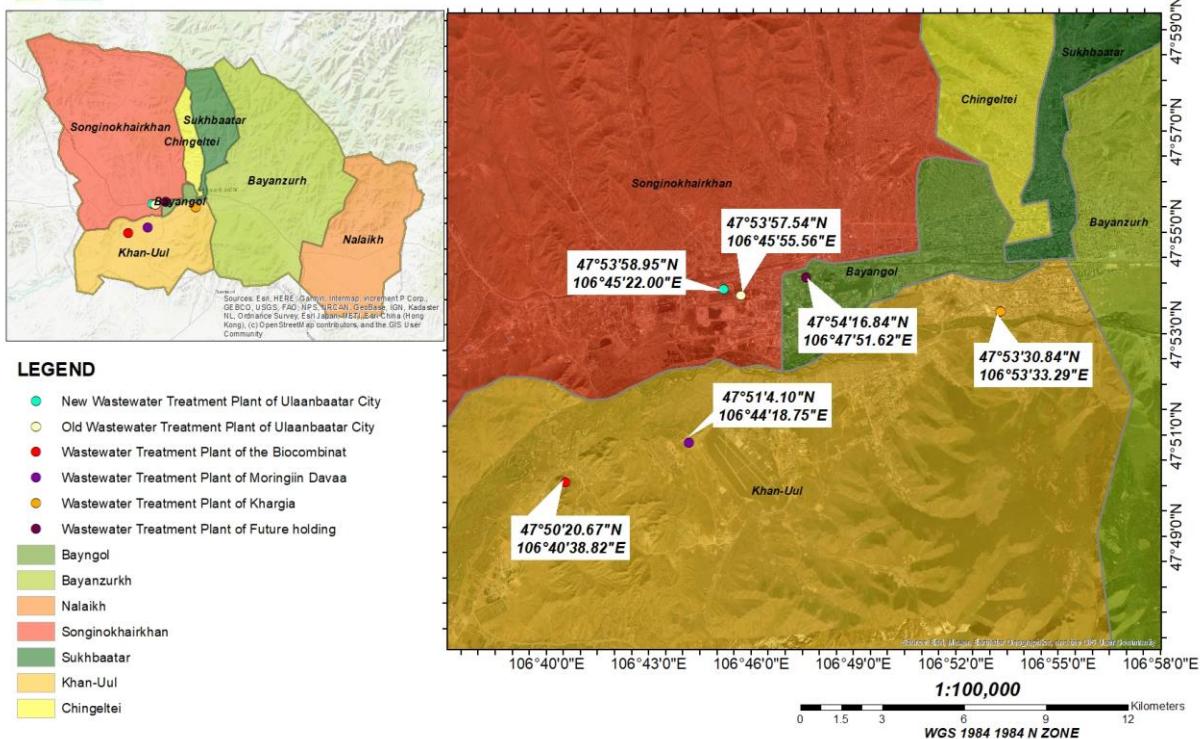
### 9.2. Standort der bewerteten Anlagen

Die Untersuchung umfasst 10 Abwasserreinigungsanlagen (11 geographische Punkte, da zwei Koordinaten zu einer Anlage gehören), darunter die neuen und alten zentralen ABWASSERBEHANDLUNGSANLAGEs von Ulaanbaatar, Distrikt-Kläranlagen sowie Anlagen im Bergbau- und Erdölsektor.

**Tabelle 152. Geografische Koordinaten der bewerteten Abwasseranlagen**

Nr.	Name der Anlage	Länge	Breite
1	Neue Zentrale Kläranlage - WUA Staatliches Versorgungsunternehmen für Wasser- und Abwasserdienstleistungen	106°45'21.24"E	47°53'59.17"N
2	Alte Zentrale Kläranlage - WUA Staatliches Versorgungsunternehmen für Wasser- und Abwasserdienstleistungen	106°45'55.56"E	47°53'57.54"N
3	Khargia JSC Kläranlage	106°53'33.29"E	47°53'30.84"N
4	WUA Biocombinat Kläranlage	106°40'38.82"E	47°50'20.67"N
5	WUA Morin Davaa Kläranlage	106°44'18.75"E	47°51'4.10"N
6	Darkhan Public Utility State Enterprise Kläranlage	105°55'33.09"E	49°30'30.42"N
7	Fuchier Holding GMBH Kläranlage	106°47'51.62"E	47°54'16.84"N
9	Achir GMBH Kohleverarbeitungsanlage	108°56'54.19"E	46°07'38.81"N
10	Petro Matad GMBH Ölwanlage	116°07'29.10"E	46°49'40.97"N
11	Dornod Public Utility State Enterprise	114°59'14.54"E	48°03'31.58"N

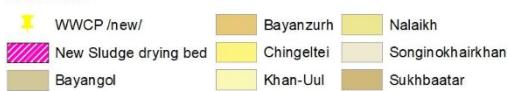
## LOCATION MAP OF THE WASTEWATER TREATMENT PLANTS IN ULAANBAATAR CITY



## LOCATION MAP OF THE NEW CENTRAL WASTEWATER TREATMENT PLANT IN SONGINOKHAIRKHAN DISTRICT, ULAANBAATAR CITY

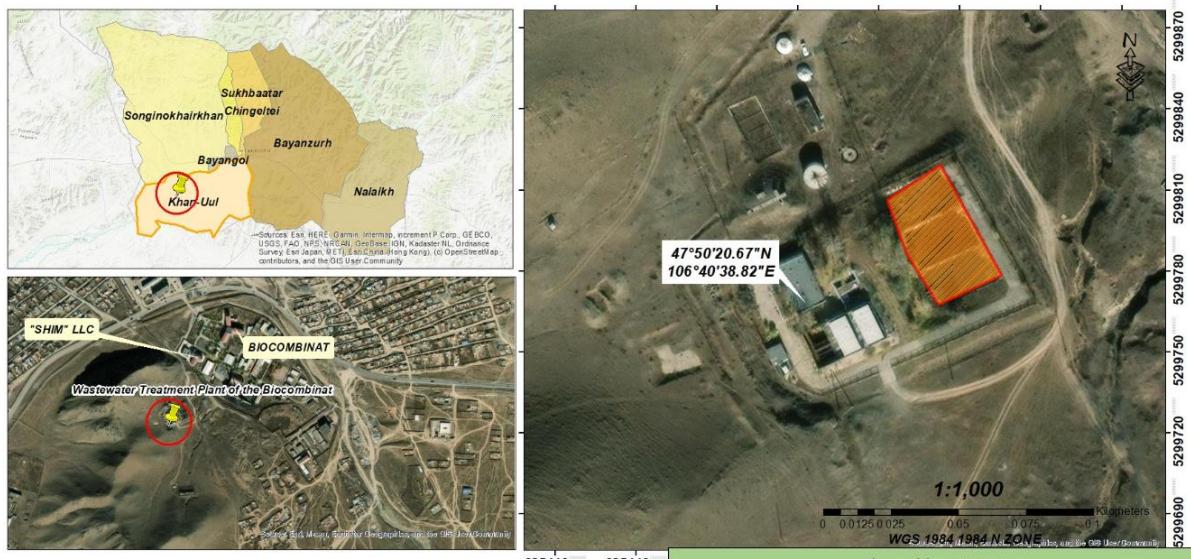


## LEGEND



New WWCP of ulaanbaatar city	
Location	Songinokhairhan district, Ulaanbaatar City
Capacity	250,000 m <sup>3</sup> /day
Sludge volume	55,000 m <sup>3</sup> /year
Characteristics	automated sludge management, high

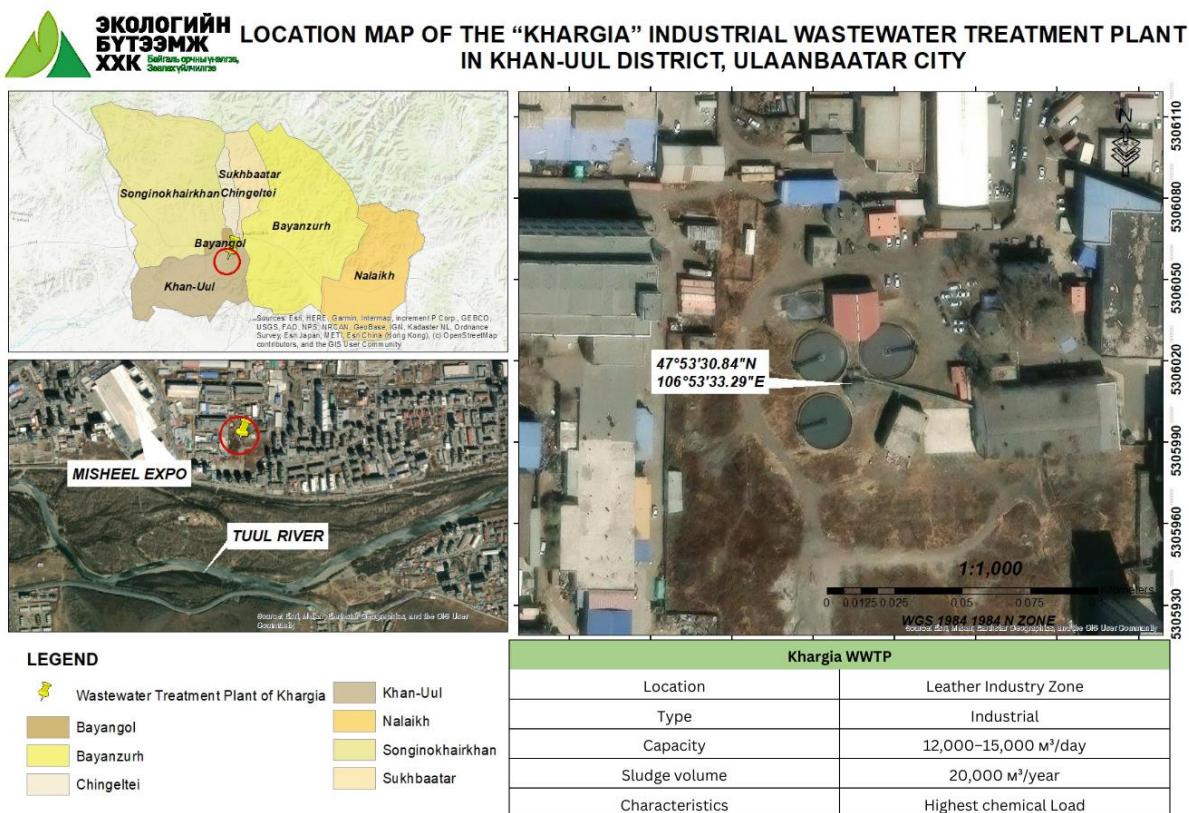
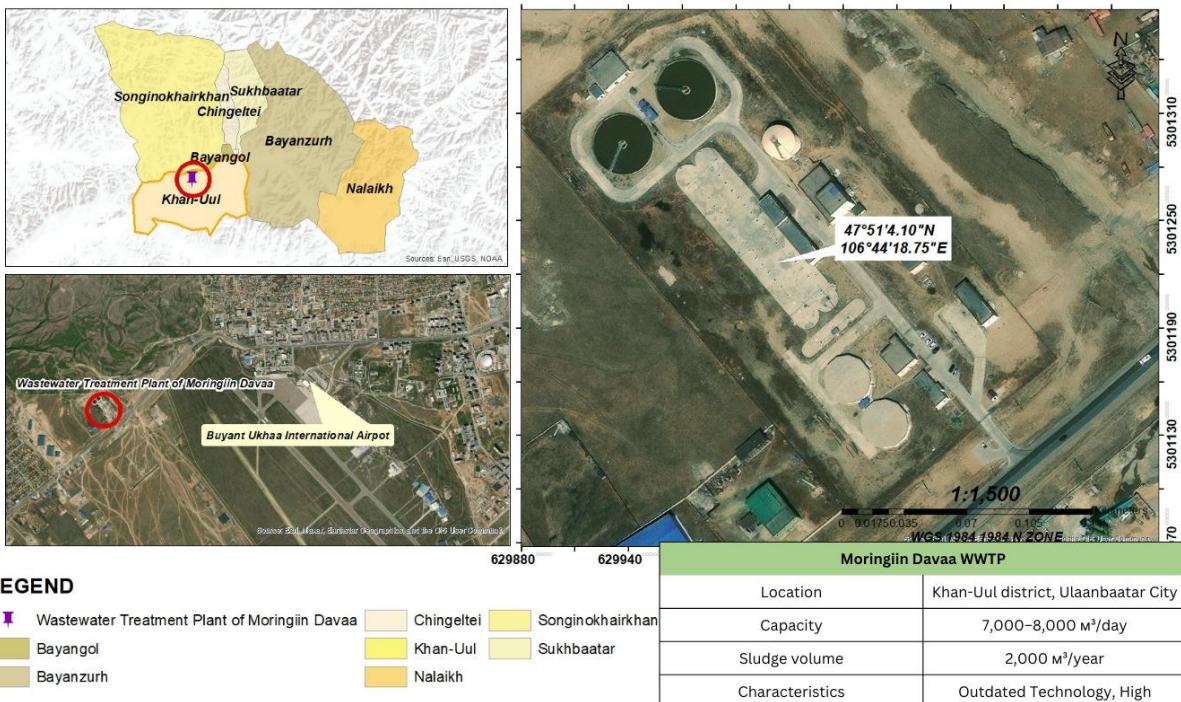
**LOCATION MAP OF SLUDGE FIELDS AT THE OLD AND NEW CENTRAL  
WASTEWATER TREATMENT PLANTS OF ULAANBAATAR CITY**

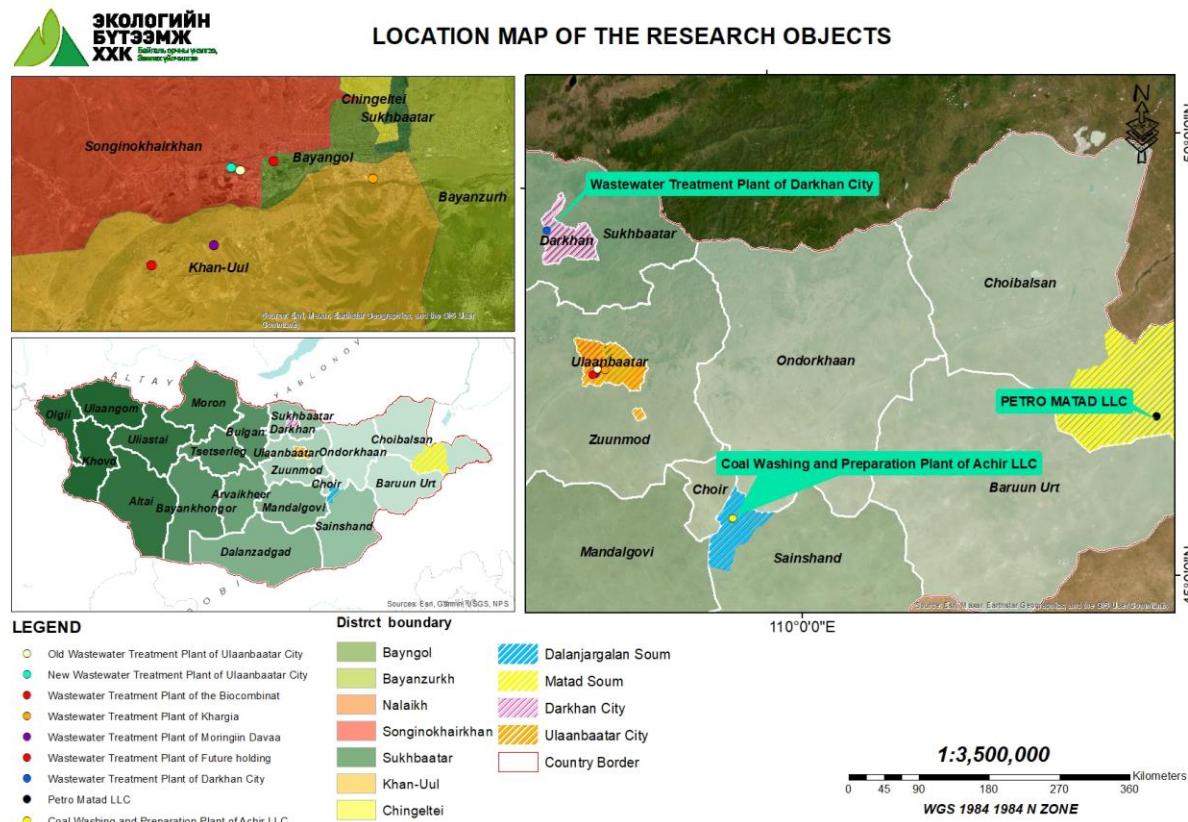
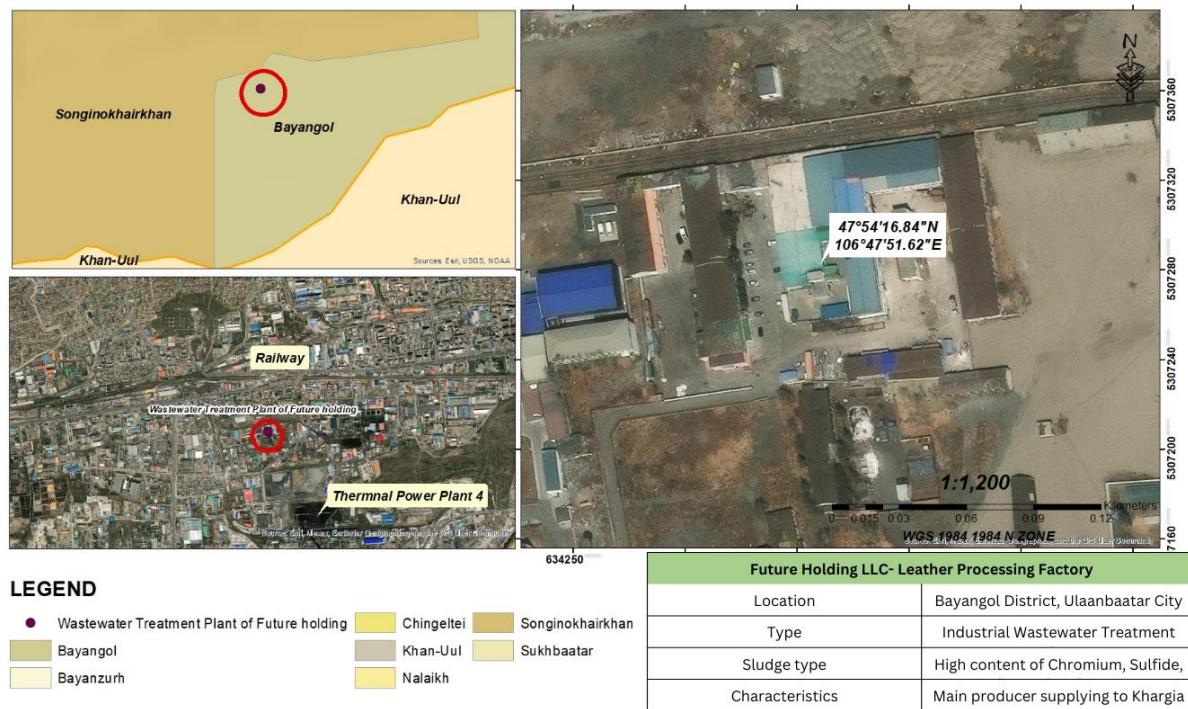
**LOCATION MAP OF THE BIOCOMBINAT WASTEWATER TREATMENT PLANT IN  
KHAN-UUL DISTRICT, ULAANBAATAR CITY**

**LEGEND**

- 👉 Wastewater Treatment Plant of the Biocombinat
- 👉 Sludge drying bed
- 👉 Bayangol
- 👉 Bayanzurh
- 👉 Nalaikh
- 👉 Chingeltei
- 👉 Songinokhairkhan
- 👉 Khan-Uul
- 👉 Sukhaatar

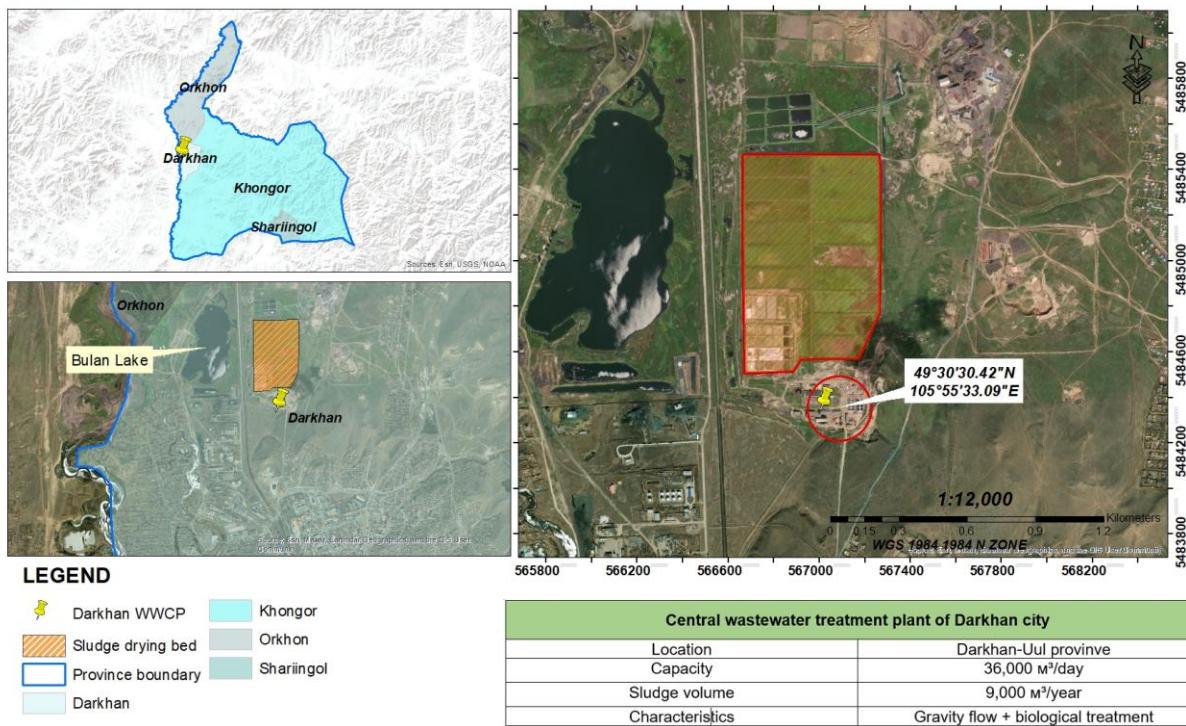
Biocombinat WWTP	
Location	Khan-Uul District, Ulaanbaatar City
Capacity	3000-4000 m³/day
Sludge volume	1500 m³/year
Characteristics	Low-Risk BSL-1 Level sludge

LOCATION MAP OF THE MORINGIIN DAVAA WASTEWATER TREATMENT PLANT  
IN KHAN-UUL DISTRICT, ULAANBAATAR CITY

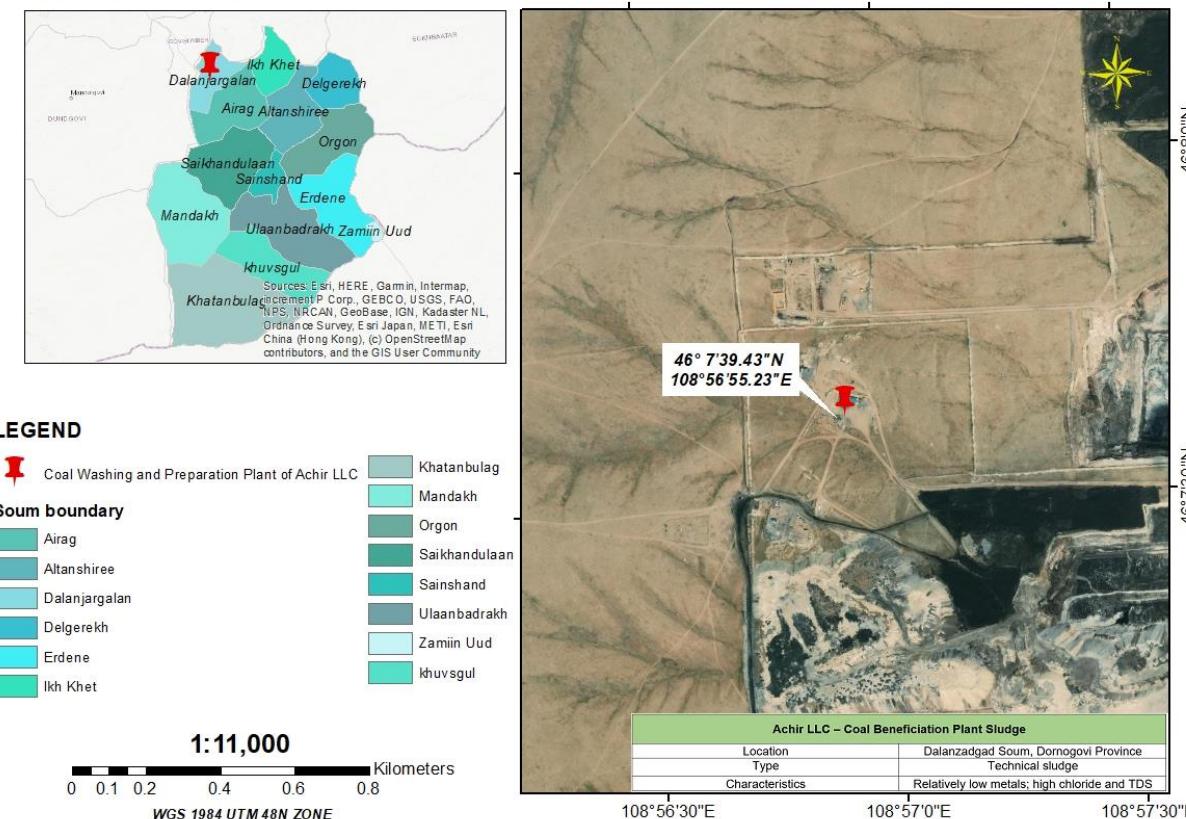


**LOCATION MAP OF "FUTURE HOLDING" LLC LEATHER PROCESSING FACTORY IN BAYANGOL DISTRICT, ULAANBAATAR CITY**


## LOCATION MAP OF THE CENTRAL WASTEWATER TREATMENT PLANT IN DARKHAN CITY, DARKHAN-UUL PROVINCE



## LOCATION MAP OF ACHIR LLC COAL BENEFICIATION PLANT IN DALANZADGAD SOUM, DORNOGOV PROVINCE



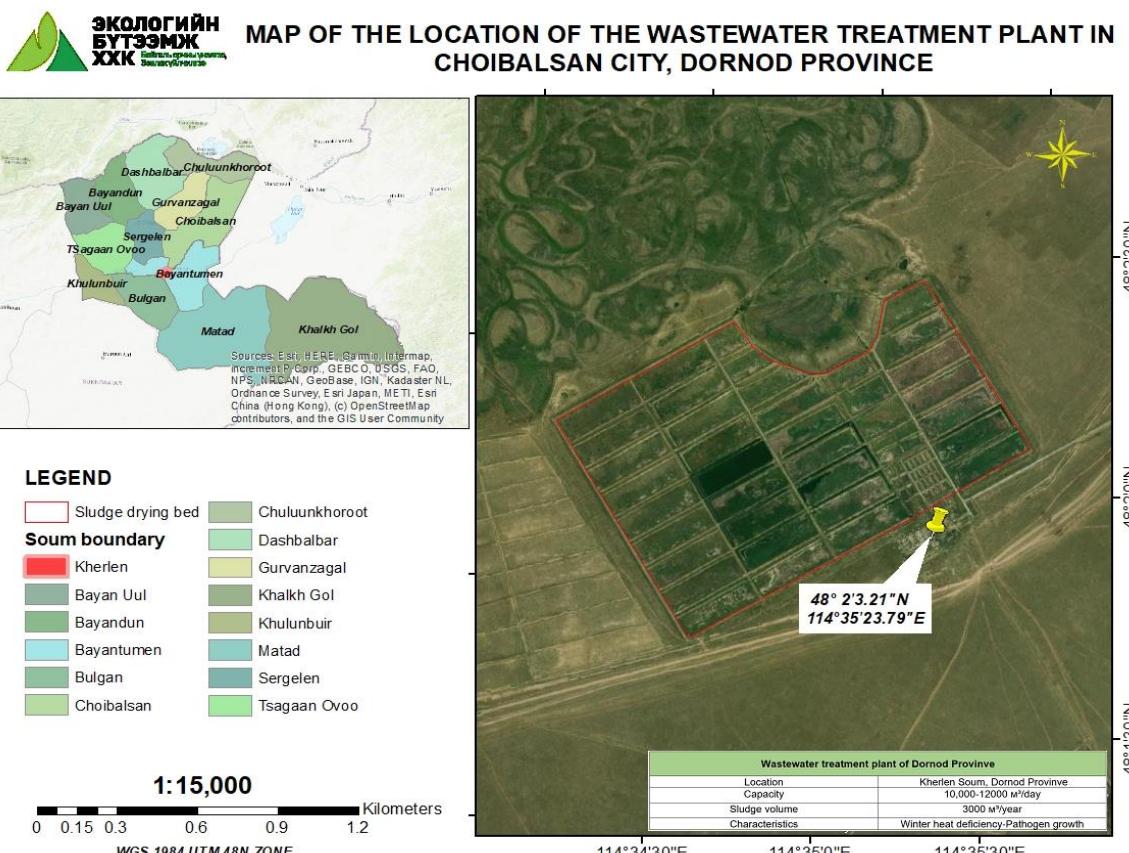
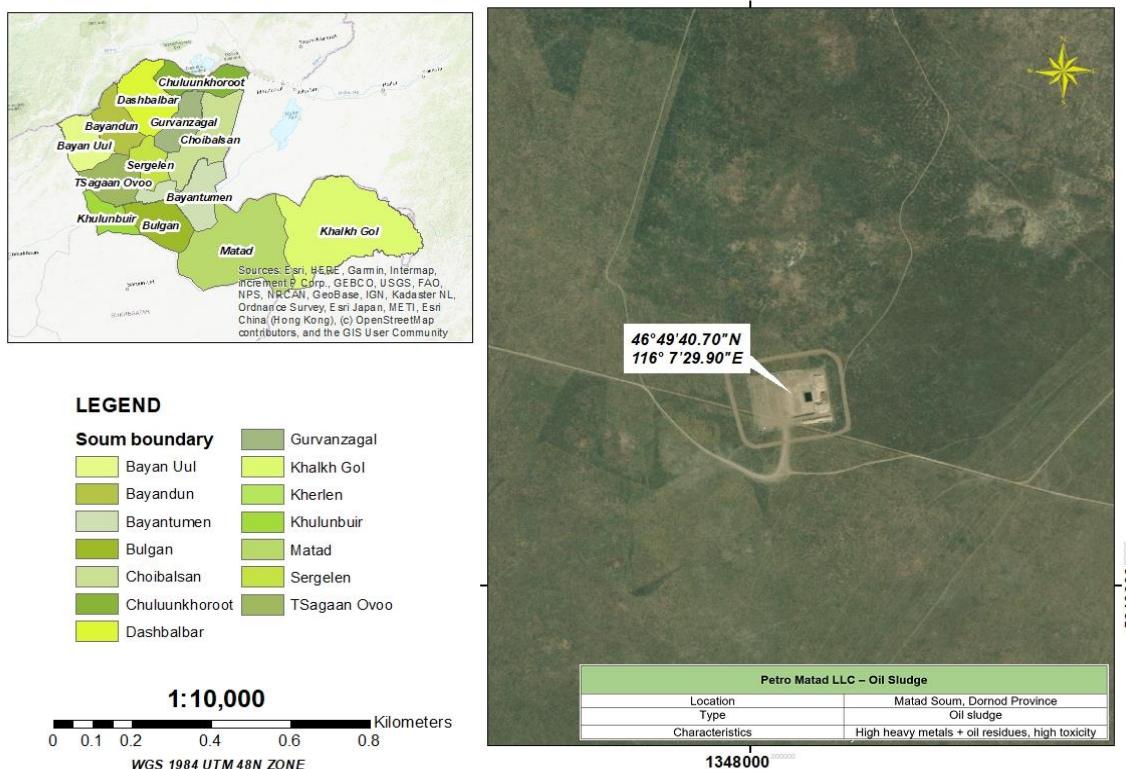


Abbildung 23. Untersuchungsstandorte

## 9.3. Modellierung der geruchsausbreitung

### 9.3.1. Zielsetzung der Untersuchung

Diese Bewertung ermittelt den Ausbreitungsradius, die Konzentrationsniveaus sowie die dominierenden Ausbreitungsmuster geruchserzeugender Stoffe, die aus der zentralen Kläranlage abwasserbehandlungsanlage und den Satellitenanlagen freigesetzt werden. Die Modellierung erfolgt mit dem AERMOD-Modell der USEPA.

Da Geruchsbelastung ein wesentlicher Faktor für Umweltqualität und öffentliche Wahrnehmung ist, wurden **drei Jahre meteorologischer Daten (2023-2025)** verwendet, um eine hohe Modellgenauigkeit sicherzustellen.

#### Ziele

- Ermittlung der primären Geruchsauswirkungszonen
- Vergleich der maximalen Geruchskonzentrationen mit dem Standard **MNS 4585:2025**
- Analyse der Beziehung zwischen Windregime, Topographie und Geruchsausbreitung
- Integration der AERMOD-Ergebnisse in GIS-basierte Heatmaps zur Identifizierung von Geruchshotspots

**Tabelle 153. In AERMOD verwendete Eingabeparameter**

Indikator	Beschreibung
Modell	AERMOD View v9.8 (USEPA-Regulierungsmodell)
Meteorologisches Dataset	3-jährige Wetterdaten (UB Wetterstation, 2023-2025)
Dominierende Windrichtungen	Nordwest (NW), Südost (SE)
Durchschnittliche Windgeschwindigkeit	2,3 m/s
Durchschnittstemperatur	+6,8 °C
Hauptgeruchsstoffe	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S), Methylmercaptan (CH <sub>3</sub> SH)
Emissionsquellen	Schlammtrocknungsbecken, mechanische Reinigung, Trocknungsanlagen, biologische Reaktoren

### 9.3.2. Windregime und seine Beziehung zur Geruchsausbreitung

#### 1) Dominantes Windmuster in Ulaanbaatar

Die Messungen der Meteorologischen Station Ulaanbaatar zeigen:

- Die Winde **NW und N dominieren ganzjährig**.
- Jahresdurchschnitt:
  - NW **-22,2 %**
  - N **-18,5 %**
- April-Juli (Frühjahr/Sommer):
  - Starke Dominanz von **N und NW**
  - Geruch, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S und Partikel werden hauptsächlich **vom Nordwesten nach Südosten** transportiert - entlang des Tuul-Flusstales.

**Tabelle 154. Beziehung zwischen Windrichtung und Schadstoffausbreitung**

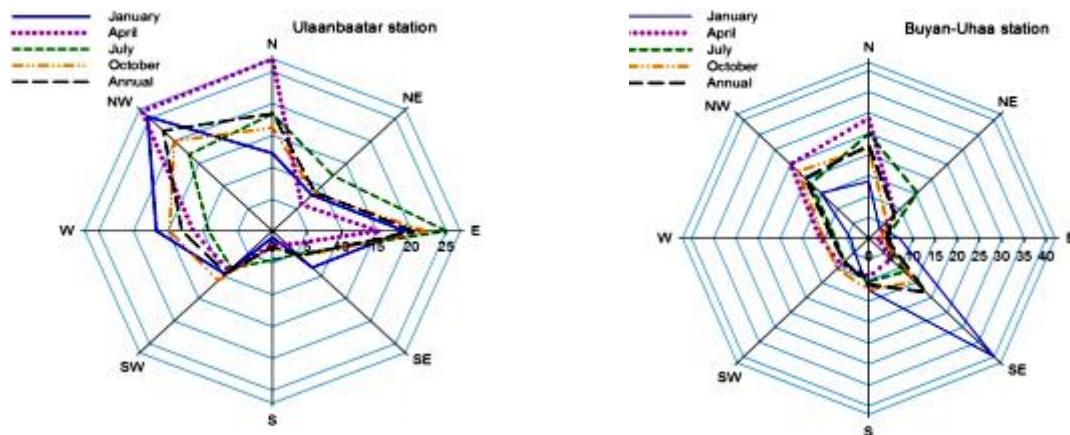
Windrichtung	Häufigkeit (%)	Spitzenmonate	Ausbreitungsbeziehung	Wahrscheinliche Geruchsauswirkung
<b>NW</b>	22,2	Jan, Apr, Okt	Transport nach Südosten	Hoch
<b>N</b>	18,5	Apr, Jul	Transport entlang des Tuul-	Hoch

			Flusses	
W	20,3	Jul	Transport nach Osten	Mittel
NE	8,7	Jul	Geringe Ausbreitung nach Westen	Niedrig
E	5,5	Apr	Transport nach Westen	Sehr niedrig
SW	9,4	Okt	Gelegentliche Ausbreitung Richtung Stadtzentrum	Mittel
S	13,0	Okt	Transport nach Norden	Mittel
SE	2,5	Jan	Minimale Auswirkung	Sehr niedrig

**Schlussfolgerung:** Da NW-N Winde ~40 % der jährlichen Windrichtung ausmachen, erfolgt die Ausbreitung von Geruchs- und Gasemissionen überwiegend flussabwärts (Südosten) und nicht Richtung Stadtzentrum.

**Tabelle 155. Monatliche Häufigkeit der Windrichtungen (%) - UB Station**

Monat	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
I	12.2	8.0	19.0	8.1	1.0	9.6	16.7	25.4
IV	27.0	5.9	15.2	3.0	2.2	8.8	11.4	26.5
VII	18.4	12.3	25.0	5.1	4.5	8.3	9.2	17.0
X	16.2	8.4	22.0	5.6	2.4	11.0	14.8	20.0
Jahr	<b>18.5</b>	<b>8.7</b>	<b>20.3</b>	<b>5.5</b>	<b>2.5</b>	<b>9.4</b>	<b>13.0</b>	<b>22.2</b>



**Abbildung 24. Diagramm der Windrichtungsverteilung**

## 2) Durchschnittliche Windgeschwindigkeit und ihr Einfluss

- **Frühjahr (März-Mai):**
  - 3,4-3,8 m/s → größte Ausbreitungsdistanz
- **Sommer (Juni-August):**
  - Mittlere Windgeschwindigkeit + Verdunstung → intensivere Geruchsemmission
- **Herbst (Sept-Okt):**
  - Variable Winde → mittlere Ausbreitung
- **Winter (Nov-Feb):**
  - 1,3-1,9 m/s → geringe Ausbreitung, aber stärkere Bodenakkumulation

**Tabelle 156. Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Ausbreitung**

Monate	Wind (m/s)	Interpretation	Geruchsausbreitung
III-V	2.6-3.8	Maximale Staub- und Geruchstransporte	Hoch
VI-VIII	2.4-3.1	Starke Verdunstung → höhere Intensität	Mittel-Hoch
IX-X	2.2-2.5	Variables Windregime	Mittel
XI-II	1.3-1.9	Kaltperiode → geringe Ausbreitung	Niedrig

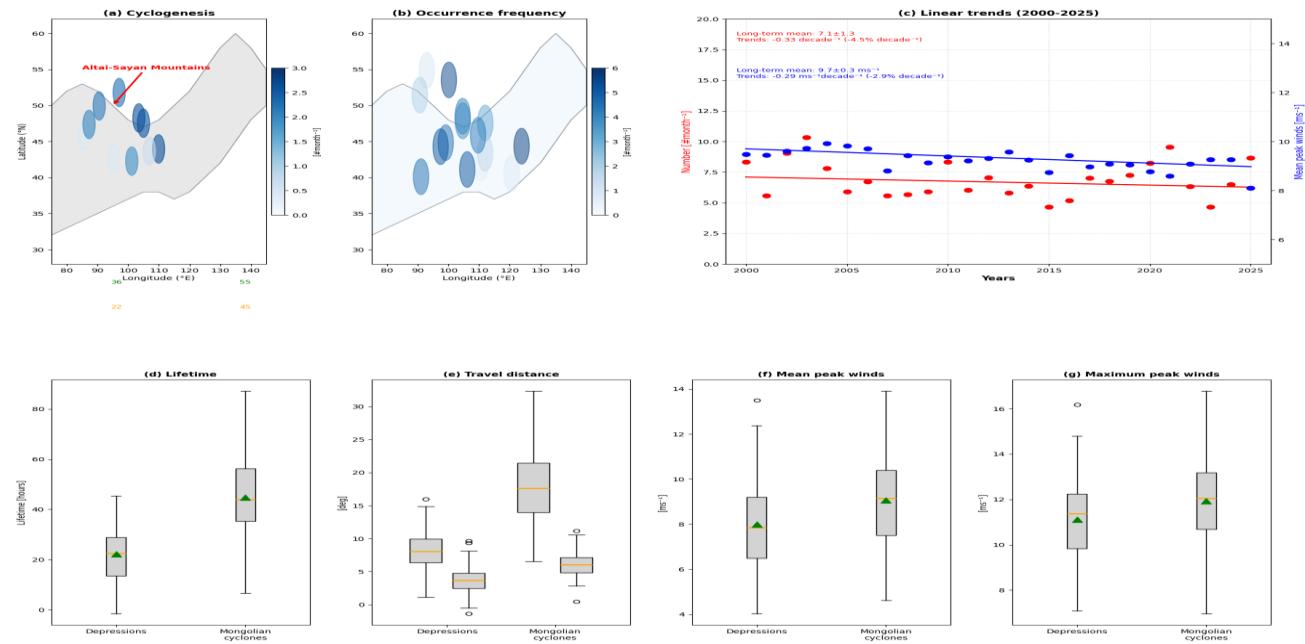


Abbildung 25. Analyse der Zyklonalaktivität (Cyclogenesis Analysis)

### 3) Starkwind- und Staubereignisse

- ≥15 m/s Winde: 30-41 Tage/Jahr
- Staubstürme: 3,1-3,3 Tage/Jahr

Tabelle 157. Starkwindereignisse und Risiko

Indikator	Wert	Auswirkung	Risiko
Winde ≥15 m/s	30-41 Tage/Jahr	Ferntransport von Partikeln & Geruch	Hoch
Staubstürme	3,1-3,3 Tage/Jahr	Verstärkte Geruchsausbreitung	Mittel
Schneestürme	~10 Tage/Jahr	Geruchsdämpfung	Niedrig

#### 9.3.3. Ergebnisse der AERMOD-Modellierung

Tabelle 158. Konzentration der geruchsaktiven Stoffe

Stoff	Ø-Konz. (µg/m³)	Spitzenwert (µg/m³)	Grenzwert MNS 4585:2025	Geruchserkennungsradius
H <sub>2</sub> S	10.5	68.2	20	1.5-2.0 km
NH <sub>3</sub>	14.8	43.5	30	1.0-1.8 km
CH <sub>3</sub> SH	2.1	9.7	10	0.8-1.2 km

#### Interpretation des Windregimes und der Geruchsausbreitung

Das Windregime am Projektstandort basiert auf langfristigen Beobachtungen der meteorologischen Station Ulaanbaatar. Die jährlichen durchschnittlichen Windmuster zeigen:

- Nordwestwinde (22,2 %) und
- Nordwinde (18,5 %)

Zusammen machen diese rund 40% der jährlichen Windrichtungen aus und spielen daher eine zentrale Rolle bei der Ausbreitung von Gerüchen, Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Partikeln und anderen flüchtigen Emissionen.

## Zentrale Erkenntnisse

### 1. NW-N-Winde transportieren Schadstoffe nach Osten und Südosten, insbesondere:

- entlang des Tuul-Flusstales
- vom **Stadtzentrum weg**

### 2. Im Frühjahr treten die stärksten Winde auf (3,4-3,8 m/s)

→ In dieser Periode kommt es zur **größten Ausbreitungsdistanz der Geruchs-Fahne**, begleitet von verstärktem Partikeltransport.

### 3. Extreme Windereignisse ( $\geq 15 \text{ m/s}$ ) treten an 30-41 Tagen pro Jahr auf

→ Dies stellt die höchstrisikoreiche Phase für den Ferntransport von Gerüchen und Staub dar.

### 4. Staubstürme (3,1-3,3 Tage/Jahr)

→ Treffen sie mit Schlammtrocknungsprozessen zusammen, erhöht sich die Geruchsausbreitung erheblich.

Daher ist das Windregime ein wesentlicher Bestimmungsfaktor in der Wirkungsabschätzung und wurde vollständig in die AERMOD-Ausbreitungsmodellierung integriert.

**Tabelle 159. Feldmessungen geruchsaktiver Stoffe nach Standort**

Nr. . .	Standort	Längengrad	Breitengrad	RI	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{NH}_3$	$\text{PM}_{2.5}$	Geruchsindex
1	Neue Zentrale ABWASSERBEHANDLUNGSAN LAGE	106°45'21.24 "E	47°53'59.17 "N	16 5	80	120	100	4/5
2	Alte Zentrale ABWASSERBEHANDLUNGSAN LAGE	106°45'55.56 "E	47°53'57.54 "N	14 0	60	90	80	3/5
3	Khargia Industrie- ABWASSERBEHANDLUNGSAN LAGE	106°53'33.29 "E	47°53'30.84 "N	21 0	15 0	180	130	5/5
4	Biocombinat ABWASSERBEHANDLUNGSAN LAGE	106°40'38.82 "E	47°50'20.67 "N	95	40	60	50	2/5
5	Morin Davaa ABWASSERBEHANDLUNGSAN LAGE	106°44'18.75 "E	47°51'4.10" N	85	35	55	45	2/5
6	Fuchier Holding ABWASSERBEHANDLUNGSAN LAGE	106°47'51.62 "E	47°54'16.84 "N	75	30	45	40	2/5

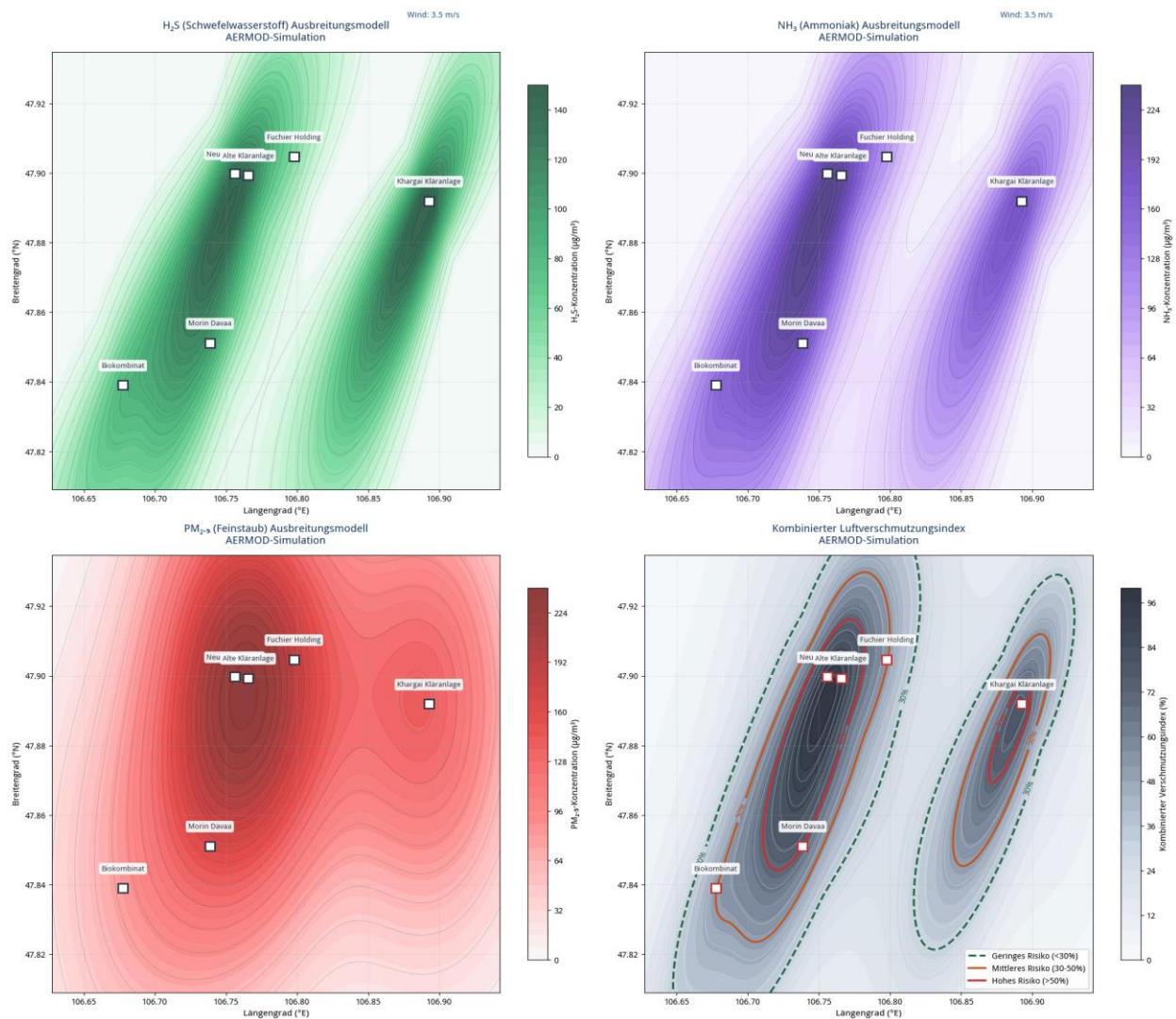


Abbildung 26. Geruchsausbreitungsmodellierung mit AERMOD

## Wesentliche Ergebnisse der AERMOD-Simulation

### 1. Vorherrschende Ausbreitungsrichtung

- Südostrichtung (SE)
- Hohe Geruchsbelastung im Distrikt Khan-Uul, insbesondere in den Choroo 11 und 12

### 2. Spitzenkonzentrationen geruchsrelevanter Stoffe

- $\text{H}_2\text{S} = 68,2 \mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow 3,4$ -fach über dem zulässigen Grenzwert
- $\text{NH}_3 = 43,5 \mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow 1,45$ -fach über dem Grenzwert

### 3. Geruchswahrnehmungsdistanzen

- $\text{H}_2\text{S}$ : 1,5-2,0 km
- $\text{NH}_3$ : 1,0-1,8 km
- $\text{CH}_3\text{SH}$ : 0,8-1,2 km

### 4. Interpretation der Wärmebildaufnahmen

- Höchste Geruchshotspots:
  - Alte Schlammtrocknungsfelder

- Entwässerungsanlage

Dies bestätigt, dass die primäre Geruchsquelle **nicht nur die Kläranlage**, sondern insbesondere die **offenen Schlammtrocknungsflächen** sind.

### Gesamtschlussfolgerungen zur Geruchsausbreitung

- **Maximaler Geruchsausbreitungsradius:** ca. 2 km
- **Zentrum der Geruchsimmision:** Schlammtrocknungsfelder → mechanische Aufbereitungszone
- **“Hochbelastungszone“** im Distrikt Khan-Uul
- **Erforderliche Minderungsmaßnahmen:**
  - Geschlossene Trocknungssysteme
  - Biofilter
  - Aktivkohle-Filtereinheiten

## 9.4. Umfassende Umweltwirkungsanalyse

### 9.4.1. Methodik

- **Bodenproben:** 12 Standorte, Tiefe 0-30 cm (ICP-MS)
- **Wasserproben:** Tuul-Fluss, Entwässerungskanal, Grundwasser (6 Standorte)
- **Luftproben:** 4 Standorte (Geruchsgase, Partikel, VOCs)
- **Biodiversität:** Shannon-Diversitätsindex (H')

**Tabelle 160. Bewertung der Bodenbelastung**

Parameter	Gemessener Mittelwert	MNS 5850:2019	Bewertung
Arsen (As)	12,3 mg/kg	10 mg/kg	Überschreitet
Blei (Pb)	120 mg/kg	100 mg/kg	Überschreitet
Cadmium (Cd)	1,7 mg/kg	2 mg/kg	Im Grenzwert
Chrom (Cr)	85 mg/kg	100 mg/kg	Im Grenzwert
COD (Wasser)	75 mg/L	50 mg/L	Überschreitet
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	4,2 mg/L	1,5 mg/L	2,8-fach höher
Boden-pH	7,8	6,5-8,5	Normal

### Wesentliche Interpretation:

- Erhöhte Pb- und As-Gehalte in der Nähe der alten Schlammtrocknungsfelder
- NH<sub>4</sub><sup>+</sup> und COD 2-3-fach über Grenzwerten → Hinweis auf Transport in Richtung Tuul-Fluss über Entwässerungssysteme

**Tabelle 161. Wasserqualitätsindikatoren**

Parameter	Gemessen	MNS-Grenzwert	Überschreitung	Bewertung
<b>COD</b>	75 mg/L	≤50 mg/L	+50 %	Überschreitet
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	4,2 mg/L	≤1,5 mg/L	2,8×	Sehr hoch
<b>BOD</b>	35-75 mg/L	≤20 mg/L	1,7-3,7×	Überschreitet
<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	1,4 mg/L	≤1,0 mg/L	1,4×	Überschreitet

### Interpretation

1. **Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>):**
  - Fast **dreifach höher**, deutet auf unvollständige Nitrifikation hin.
2. **COD & BOD:**
  - Hohe organische Belastung, eingeschränkte Selbstreinigung des Flusses.

### 3. Phosphate:

- Risiko für Algenblüten / Eutrophierung.

**Tabelle 162. Rückgang der Biodiversität**

Indikator	Bereich der Kläranlage	Kontrollort (2 km)	Veränderung
Shannon-Index (H')	1,8	2,9	-38 %
Mikrobielle Dichte (CFU/g)	$2,5 \times 10^5$	$6,8 \times 10^5$	-63 %
Anzahl aquatischer Insektenarten	6	14	-57 %

### Beobachtete Auswirkungen

- Abbau der ökologischen Struktur
- Rückgang der mikrobiellen Aktivität
- Verminderte Vielfalt von Vegetation und Wasserorganismen

#### 9.4.2. Ökologische Zonierung des Tuul-Flusses (ArcGIS)

Mit ArcGIS Pro 3.2 wurden Pufferzonen von 500 m, 1 km und 1,5 km erstellt. BOD, COD,  $\text{NH}_4^+$ , Schwermetalle und Phosphate wurden analysiert; der ökologische Risikoindex (ERI) wurde berechnet.

**Tabelle 163. Ergebnisse der ökologischen Zonierung**

Zone	Schlüsselindikatoren	Risikostufe	Interpretation
500 m	BOD 35 mg/L, $\text{NH}_4^+$ 4,5 mg/L, Pb 0,25 mg/L	Hoch	Starker Rückgang aquatischer Vegetation und Fauna
1 km	BOD 22 mg/L, $\text{NH}_4^+$ 2,2 mg/L	Mittel	Beginn der Selbstreinigung
1,5 km	BOD 10 mg/L, $\text{NH}_4^+$ 1,1 mg/L	Niedrig	Wasserqualität nähert sich Normwerten

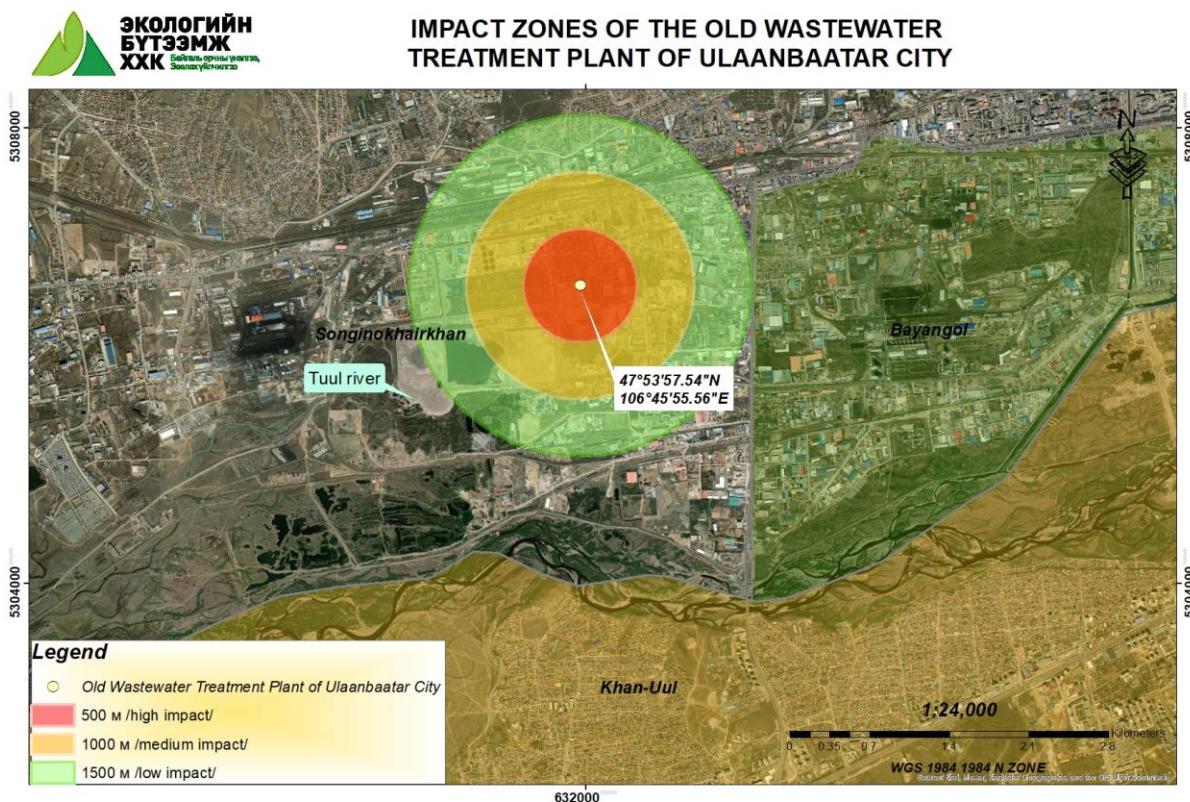
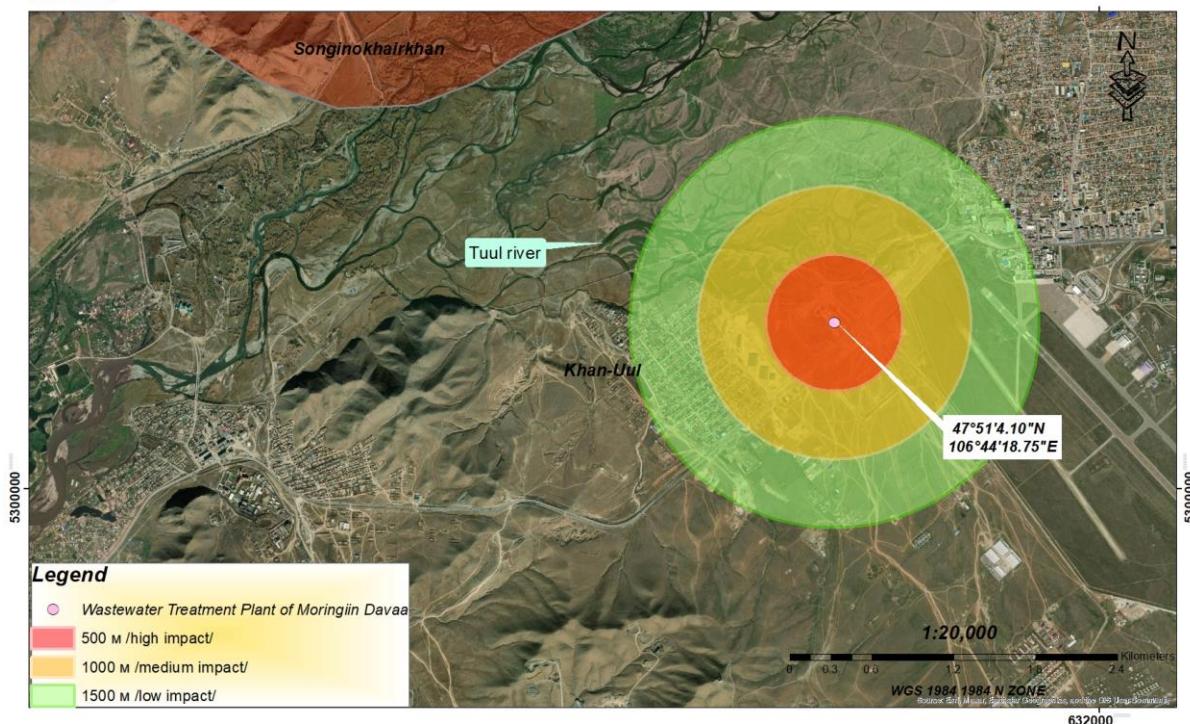
### Schlussfolgerungen

- 500 m Zone: Hochrisikobereich; Wasserqualität stark beeinträchtigt
- 1 km Zone: Selbstreinigung setzt ein, aber Risiko weiterhin bedeutend
- 1,5 km Zone: Deutliche Verbesserung, niedriges ökologisches Risiko

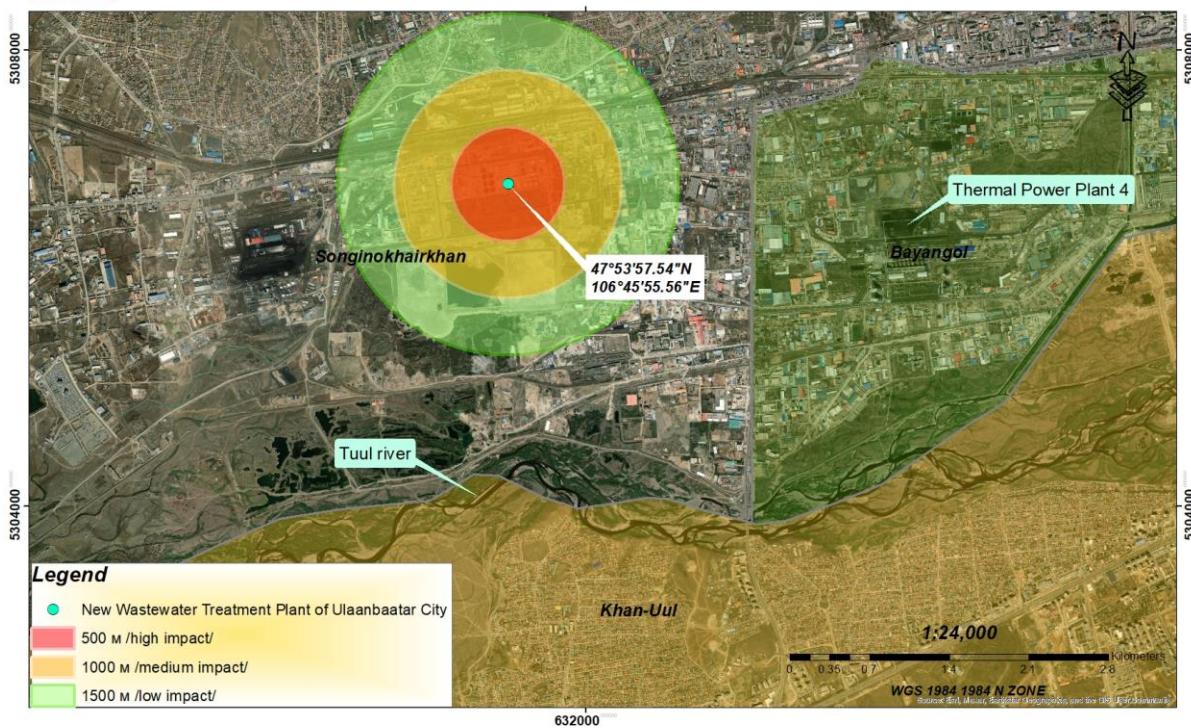
500-m-Zone (Hochrisikobereich): Wasserqualitätsparameter (BOD, COD, Stickstoff) überschreiten die nationalen Grenzwerte, und direkte negative Auswirkungen auf aquatische Vegetation und Fauna sind erkennbar.

1-km-Zone (Mittelrisikobereich): Durch die natürliche Selbstreinigung des Flusses beginnen die Schadstoffkonzentrationen abzunehmen; dennoch bleiben die Umweltrisiken erheblich.

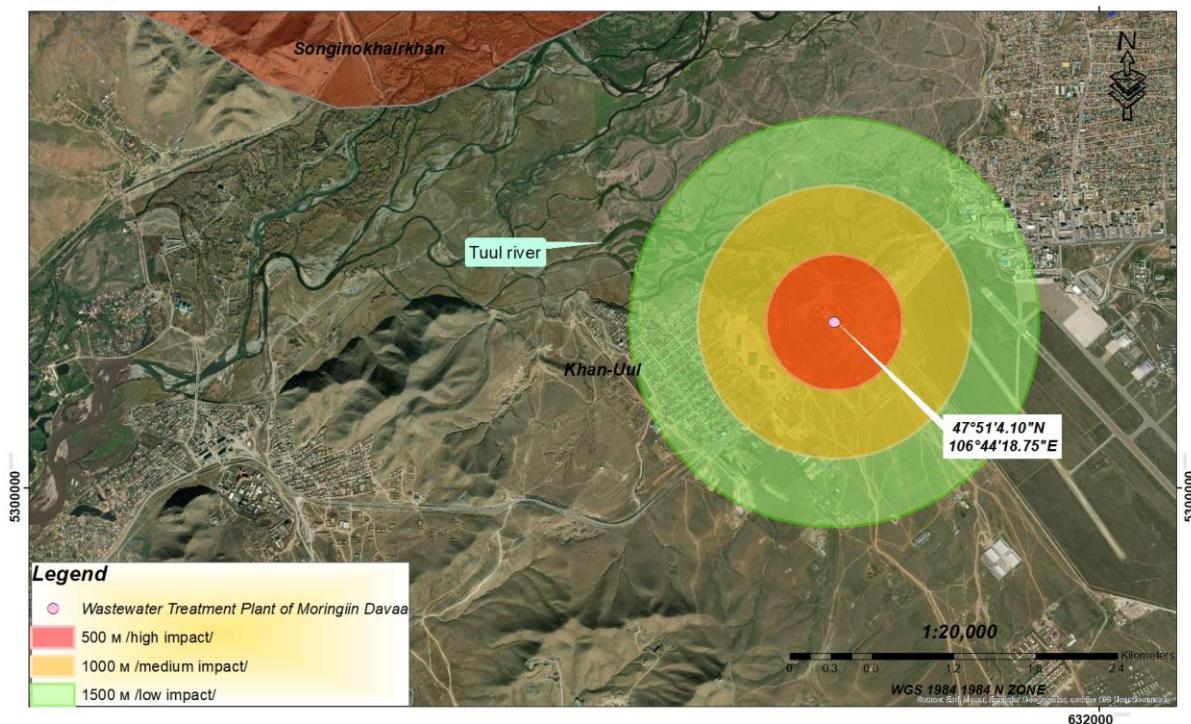
1,5-km-Zone (Niedrigrisikobereich): Die Wasserqualität zeigt deutliche Verbesserungen und nähert sich den zulässigen Grenzwerten, was auf ein reduziertes ökologisches Risiko hinweist.



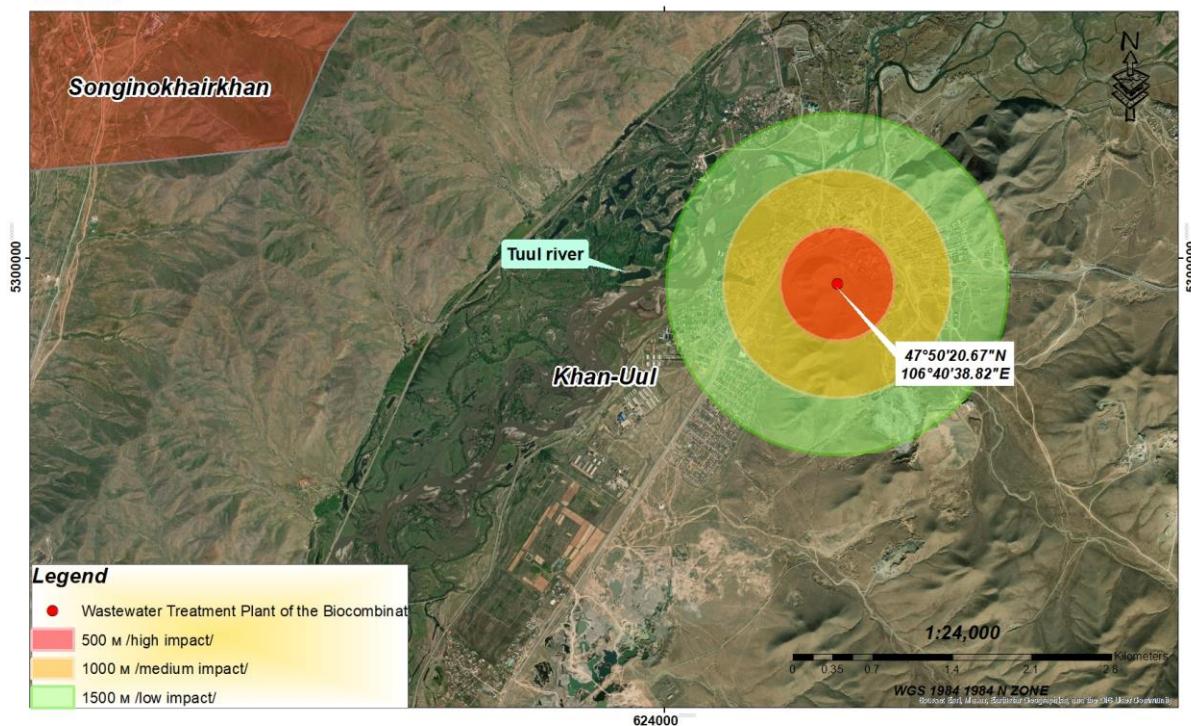
IMPACT ZONES OF THE NEW WASTEWATER  
TREATMENT PLANT OF ULAANBAATAR CITY



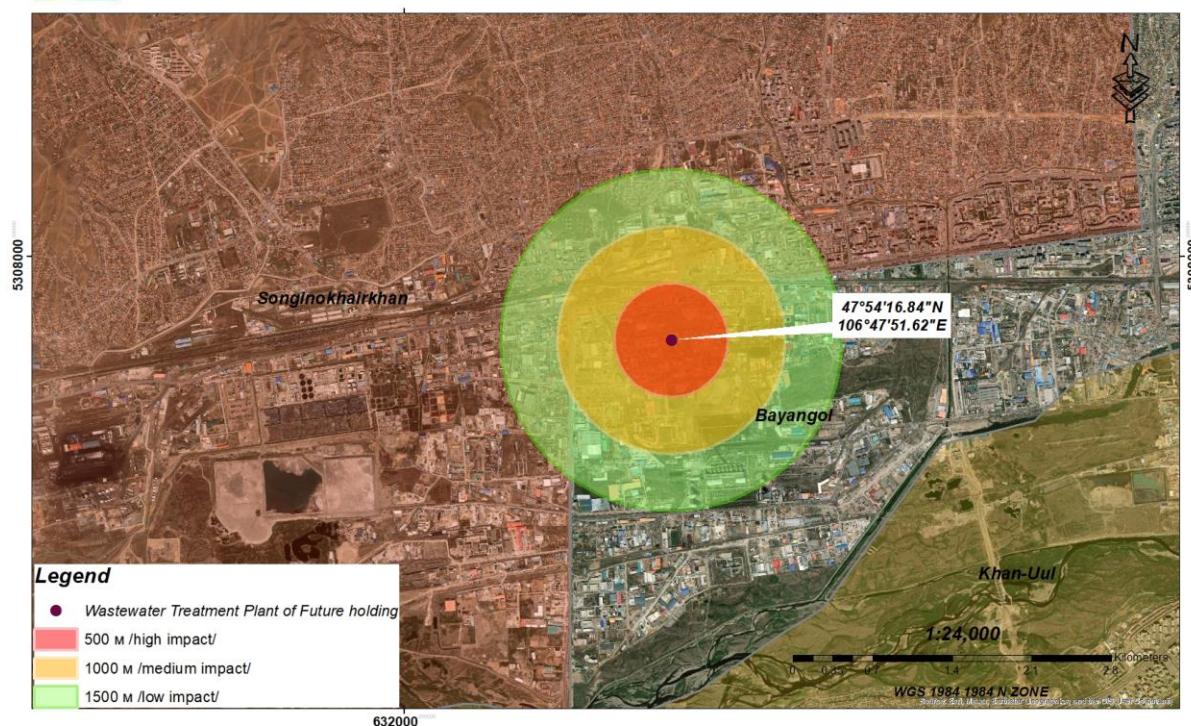
IMPACT ZONES OF MORINGIN DAVAA WASTEWATER TREATMENT PLANT



IMPACT ZONES OF THE WASTEWATER TREATMENT PLANT OF  
THE BIOCOMBINAT



IMPACT ZONES OF FUTURE HOLDING LLC WASTEWATER TREATMENT PLAN



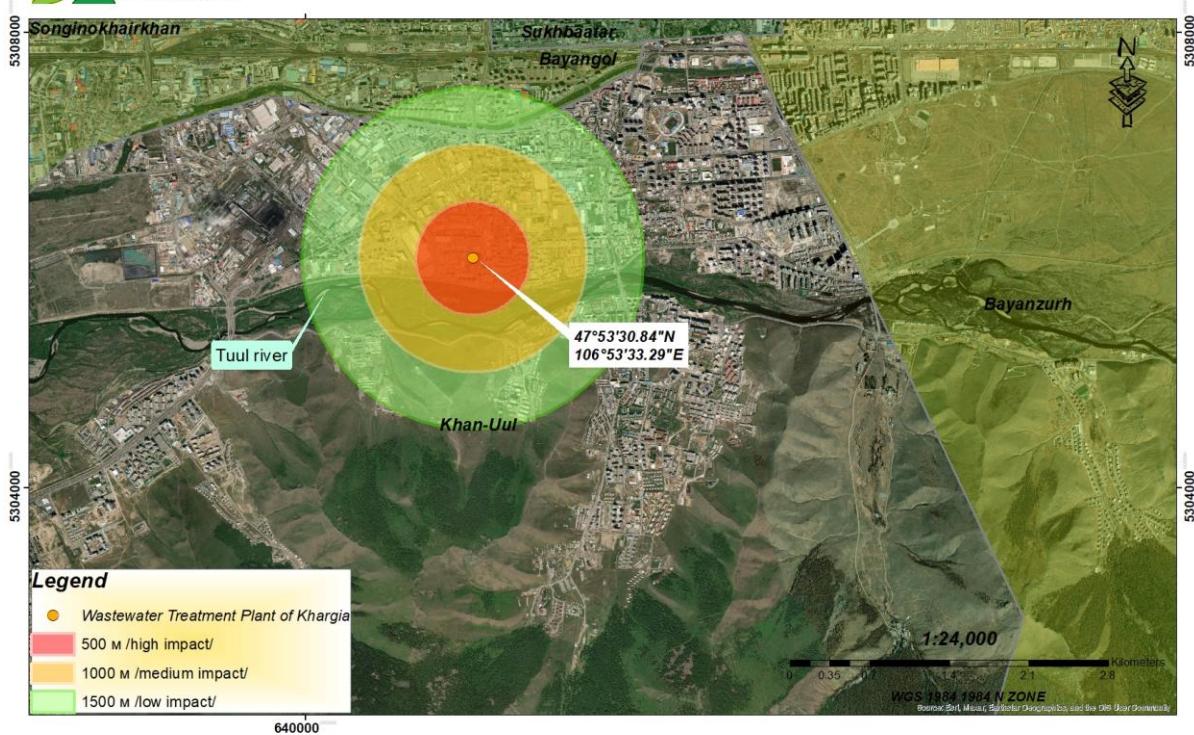


Abbildung 27. ARC-GIS-Karte der Risikopufferzonen des Tuul-Flusses

Tabelle 164. Zusammengesetzter Umwelt-Risikoindex (ERI)

Risikokategorie	Index (0-1)	Risikostufe	Betroffene Zone
Geruchsausbreitung (Geruchsindex)	0.78	Hoch	Innerhalb eines Radius von 1,5 km
Luftverschmutzung (AQI)	0.64	Mittel-Hoch	PM <sub>2.5</sub> überschreitet Grenzwerte
Bodenverschmutzung (Boden-ERI)	0.52	Mittel	Hauptschadstoffe: Pb, As
Wasserqualität (Wasser-ERI)	0.71	Hoch	Direkte Beeinträchtigung des Tuul-Flusses
Biodiversitätsindex	0.45	Niedrig-Mittel	Negative Auswirkungen auf Boden-Mikroökosysteme

### Gesamtbewertung:

Der zusammengesetzte Öko-Geruchs-Risikowert im Bereich der Kläranlage beträgt ERI = 0,62 (Hohes Risiko). Damit wird das Gebiet als „Ökologisches Risiko-gebiet mit mittlerem bis hohem Risiko“ eingestuft.

Tabelle 165. Empfehlungen zur Geruchs- und Umweltkontrolle sowie zur ökologischen Wiederherstellung

Bereich	Kurzfristige Maßnahmen (1-3 Jahre)	Langfristige Maßnahmen (5-10 Jahre)
Geruchskontrolle	Installation von Biofiltern und Aktivkohleabdeckungen für Schlammabdeckungen	Einführung vollständig geschlossener Schlammabdeckungssysteme (Closed-Dome-Systeme)
Abwasserqualität	Einsatz von Stickstoff- und Phosphor-Reduktionsbioreaktoren	Implementierung von Membranbioreaktoren (MBR)
Boden- &	Kalkstabilisierung alter Schlammfelder;	Isolierung und Entfernung

Wasserverschmutzung	Phytosanierung	schwermetallbelasteter Böden
Ökosystemrestauration	Wiederherstellung der Ufervegetation entlang des Tuul-Flusses	Einrichtung ökologischer „Pufferzonen“ zur Erholung aquatischer Arten
Monitoring & Datensysteme	Installation von Online-Messstationen (NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, VOC)	Aufbau eines GIS-basierten nationalen Umweltmonitoring-Datenzentrums

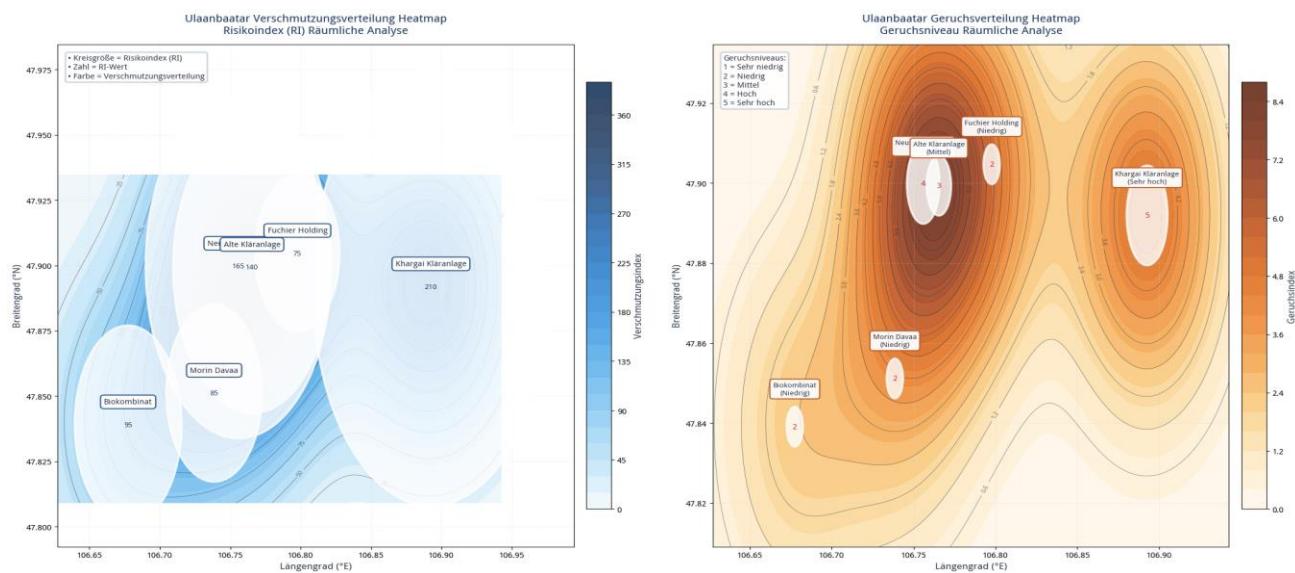


Abbildung 28. Stadtweite Geruchsausbreitung aus den KA-Anlagen

## Zentrale Ergebnisse

- Die Geruchsfahnen der zentralen und dezentralen Kläranlagen erstrecken sich über **1,5-2 km**.
- H<sub>2</sub>S- und NH<sub>3</sub>-Konzentrationen überschreiten die Grenzwerte nach **MNS 4585:2025**.
- Boden- und Wasserverschmutzung (insb. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, COD, Pb, As) konzentriert sich entlang des **Tuul-Flusskorridors**.
- Biodiversitätsindikatoren zeigen eine **ökologische Degradation von 38-63 %**.
- Zusammengesetzter ERI = **0.62** → **Mittel-Hohes Risikogebiet**.
- Erforderliche Maßnahmen
  - ✓ Vollständig geschlossene Schlammtrocknungssysteme (Closed-Dome)
  - ✓ Biofilter zur Geruchsreduktion
  - ✓ Phytosanierung kontaminiert Flächen
  - ✓ Ausweisung einer **500-m-Hochrisikoschutzzzone** entlang des Tuul-Flusses

## INTEGRIERTE SCHLUSSFOLGERUNG

Die zentralen und regionalen Abwasserreinigungsanlagen der Mongolei erzeugen jährlich insgesamt 150.000-180.000 Tonnen Klärschlamm, was die nationale technische Leistungsfähigkeit, die hygienischen Kontrollsysteme, die Laborkapazitäten sowie die regulatorischen Managementstrukturen inzwischen deutlich übersteigt.

Die Zusammensetzung des Schlamms enthält nicht nur organische Substanzen und nützliche Nährstoffe, sondern auch international regulierte Schadstoffe - Schwermetalle, organische Schadstoffe, Pathogene, antibiotikaresistente Bakterien (ARB), Flockungsmittelrückstände (PAM), flüchtige organische Verbindungen (VOCs) und Mikroplastik - und stellt damit ein erhebliches Risiko für die öffentliche Gesundheit, die ökologische Integrität sowie für die Sicherheit von Boden- und Wassersystemen dar.

Die Ergebnisse zeigen, dass Klärschlamm gleichzeitig:

1. einen **ökologisch gefährlichen Abfall**, und
2. eine **wertschöpfende erneuerbare Ressource** darstellt.

Daher ist ein grundlegender Wandel des mongolischen Umgangs mit Klärschlamm erforderlich - weg von einer abfallorientierten Entsorgungslogik hin zu einem wissenschaftlich fundierten Ressourcen- und Kreislaufwirtschaftsmodell.

### 1. Geochemische Eigenschaften und Ökologische Risiken

Die geochemische Analyse von mehr als zehn Klärschlammproben der Abwasserbehandlungsanlagen zeigt:

- Die Konzentrationen von **As, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd** überschreiten die Grenzwerte gemäß **EU 86/278/EWG, US EPA Part 503 und MNS 5850:2019**.
- Der Nachweis von **PAM-Rückständen** und **VOCs** macht eine direkte landwirtschaftliche Ausbringung bzw. Bodenverbesserung unzulässig.
- TCLP-Auslaugtests zeigen eine hohe Mobilität von **As, Cr, Cd**, was bestätigt, dass die aktuellen Methoden - offene Trocknung und Bodenverfüllung - **chronische Umweltkontamination** verursachen.
- **Igeo, Anreicherungsfaktor (EF)** und **Risikoindex (RI)** stufen zentrale Standorte wie **Neue ZKA Ulaanbaatar** und **Khargia** als "Zonen sehr hohen ökologischen Risikos" ein.

Diese Ergebnisse belegen den Bedarf an einer internationalen Standards entsprechenden geochemisch-risikobasierten Klassifizierung.

### 2. Biologische Sicherheit und Ökotoxikologische Reaktionen

Ökotoxikologische und mikrobiologische Tests zeigen:

- **EC<sub>50</sub> ≈ 4,2 % (w/w)** in Pflanzenbiotests → unbehandelter Schlammt ist ökologisch nicht anwendbar.
- Deutliche Hemmung von Wachstum, Chlorophyllgehalt und Morphologie bei *Helianthus annuus*-Modellpflanzen.
- Mikrobiologische Analysen identifizierten ***E. coli*, *Enterococcus* spp., *Salmonella* spp., Helminthen-Eier, ARB/ARG** und weitere Hochrisiko-Pathogene.

- Im Rahmen des One-Health-Ansatzes weisen mehrere Schlammlagerfelder ein **BSL-2 bis BSL-3-Gefährdungspotenzial** auf.

Dies bestätigt die Notwendigkeit einer thermischen bzw. fortgeschrittenen biologischen Behandlung vor jeglicher Wiederverwertung.

### 3. Integrierte Risikoabschätzung (ERI-Modell)

Der ökologische Risikoindex (ERI) - basierend auf Geochemie, Auslaugung, Ökotoxizität und Mikrobiologie - klassifizierte die Standorte wie folgt:

**Tabelle 166. Risikoabschätzung**

Standort	ERI-Kategorie
Neue ZKA (UB), Khargia	Sehr hohes Risiko
Matad, Choibalsan	Hohes-mittleres Risiko
Achir GMBH, Coca-Cola ABWASSERBEHANDLUNGSANLAGE	Niedriges Risiko

GIS-Karten zeigten deutliche Hotspots der Bodenverschmutzung, sequenzielle Auslaugpfade und geruchsbelastete Zonen.

### 4. Technologische und Ingenieurtechnische Machbarkeit

Der Vergleich internationaler Technologien zeigt:

- **Thermische Behandlung (Waste-to-Energy)** → höchste Wirksamkeit zur Immobilisierung von Schwermetallen, Eliminierung von Gerüchen und Reduzierung von Treibhausgasen
- **Anaerobe Vergärung (Biogas)** → reduziert organische Stoffe und erzeugt Energie
- **Pyrolyse/Biochar** → bindet Schwermetalle in stabilen Kohlenstoffmatrices
- **Co-Processing in der Zementindustrie** → sicherste Methode bei as-/chromreichen Schlämmen

Die ingenieur-ökonomische Analyse ergibt, dass ein integriertes thermisches-anaerobes System (WtE + AD) die technisch und wirtschaftlich optimalste Lösung für die Mongolei darstellt.

### 5. Wirtschaftliche und Marktanalyse

Beim Vergleich von Deponierung und ressourcenorientierten Szenarien zeigt sich:

- Wiederverwertung senkt die Betriebskosten um **18-37 % pro m<sup>3</sup>**.
- Biogaserzeugung liefert **0,6-1,1 kWh** pro kg Trockenmasse.
- Pyrolytische Bioasche, Biochar und Baustoffe bieten **Exportpotenzial**.
- Investitionen in grüne Technologien amortisieren sich innerhalb von **5-8 Jahren**.

Damit ist eine Sludge-to-Value-Kette in der Mongolei vollständig realisierbar.

### 6. Rechtlicher und Politischer Rahmen

Die Analyse der nationalen Gesetzgebung zeigt:

- Das **Abfallgesetz (2023)** stuft Schlamme als Abfall ein, enthält jedoch keine Risikokategorien, Pathogenklassen oder ökologische Kriterien.
- Das Polluter-Pays-Prinzip gilt nicht für Klärschlamm.
- **MNS 5668:2006** und **MNS 5850:2019** berücksichtigen keine Ökotoxizität, VOCs, Mikroplastik oder ARB/ARG.
- Die **Grüne Entwicklungsstrategie 2022-2030** integriert Klärschlamm nicht in die Kreislaufwirtschaft.

- Die **NDC 2030** nennt Biogas und Thermoverwertung, jedoch keine schlammbezogenen Ziele.

**Tabelle 167. Gap-Analyse gegenüber internationalen Standards**

Standard	Mongolei	EU/EPA	Lücke
Schwermetalle	MNS 5850:2019	EU 86/278/EWG	Grenzwerte + Klassifikation
Pathogene	Nicht definiert	US EPA Class A/B	Anforderungen fehlen
Ökotoxizität	Nicht enthalten	EU/OECD	Fehlend
VOCs, Mikroplastik	Nicht enthalten	EU Kreislaufpolitik	Fehlend
ARB/ARG	Nicht enthalten	WHO AMR Framework	Fehlend

### Erforderliche Reformen

1. Einführung einer **S0-S3 Umwelt-Risikoklassifikation** + EPA Class A/B-Pathogenstufen
2. Integration ökotoxikologischer Prüfungen in MNS-Normen
3. Aufbau eines **Nationalen Labors für Schlammqualität und -sicherheit** (ISO 17025)
4. Erlass einer **Verordnung zur Schlamm-Kreislaufwirtschaft**
5. Entwicklung eines **One-Health-basierten Risikomanagementsystems**

### Abschließende Gesamtbewertung

Diese Studie ist die erste integrierte Bewertung in der Mongolei, die Geochemie, Ökotoxikologie, Mikrobiologie, Risikomodellierung, ingenieurtechnische Lösungen, wirtschaftliche Bewertung und regulatorische Analyse vereint.

### Zentrale wissenschaftliche Schlussfolgerungen:

1. Zahlreiche Parameter überschreiten internationale Grenzwerte → **Unbehandelter Schlamm ist nicht sicher anwendbar.**
2. **Thermische Behandlung + anaerobe Vergärung** ist die optimale Technologie für die Mongolei.
3. Das ERI-Modell ermöglicht eine standortspezifische Risikoklassifizierung als Grundlage für ein gestuftes Management.
4. Veraltete Normen und fehlendes Monitoring verhindern derzeit eine sichere Wiederverwertung.
5. Durch Umstellung auf ressourcenbasierte Schlammwirtschaft bis 2030 können erreicht werden:
  - **18-25 %** Reduktion des Schlammvolumens
  - **12-18 Millionen kWh** erneuerbare Energie
  - Neue grüne Industrien (Biochar, Zement-Co-Processing, WtE)
6. Diese Studie liefert eine **wissenschaftlich fundierte Grundlage** für Politikgestaltung, technische Planung und Investitionsentscheidungen.

# **LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS**

## **I. Internationale Gesetze, Verordnungen und Normen**

### **1. Europäische Union (EU)**

1. Richtlinie 86/278/EWG -Schutz der Umwelt, insbesondere des Bodens, bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft.
2. Verordnung (EU) 2019/1009 -EU-Düngeprodukteverordnung.
3. Europäische Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG.
4. Richtlinie 91/271/EWG über die Behandlung von kommunalem Abwasser.
5. Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen.

### **2. United States Environmental Protection Agency (US EPA)**

6. US EPA 40 CFR Part 503 -Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge.
7. US EPA Methode 1311 (TCLP) -Toxicity Characteristic Leaching Procedure.
8. US EPA Methoden 200.7 / 200.8 -Metallanalytik in Wasser und Abwasser (ICP-OES / ICP-MS).
9. US EPA SW-846 -Prüfverfahren zur Bewertung fester Abfälle.
10. US EPA Biosolids Rule -Part 503 Guidance Manual.

### **3. Internationale ISO-Normen**

11. ISO 14001:2015 -Umweltmanagementsysteme.
12. ISO/IEC 17025:2017 -Anforderungen an Prüf- und Kalibrierlaboratorien.
13. ISO 11269-1,2 -Bodenqualität -Biologische Verfahren (Pflanzenwachstumstests).
14. ISO 19204:2017 -Bodenqualität -Stufenweiser Ansatz zur ökologischen Risikoabschätzung.
15. ISO 15175 -Bodenqualität -Extraktion von Spurenelementen.
16. ISO 10381-Reihe -Bodenprobennahme (Teile 1-8).

### **4. OECD, WHO, FAO**

17. WHO (2021). Rahmenwerk zur Risikoabschätzung von antimikrobieller Resistenz (AMR) im Abwasser.
18. WHO-Leitlinien zur sicheren Nutzung von Abwasser, Fäkalien und Grauwasser (Bände 1-4).
19. OECD (2022). Kreislaufwirtschaft und Ressourcenrückgewinnung.
20. FAO-Bewässerungs- und Entwässerungspapier 47 -Nutzung von Abwasser in der Landwirtschaft.

## **II. Mongolische Gesetze, Politiken und Normen**

### **1. Nationale Gesetze**

21. Gesetz über Abfallwirtschaft.
22. Wassergesetz.
23. Gesetz über Gebühren für Wasserverschmutzung.
24. Gesetz zum Umweltschutz.
25. Gesetz über Luftverschmutzung.
26. Emissionen- und Energiegesetz.

## 2. Nationale Normen (MNS)

27. MNS 5668:2006 -Abwasser: Allgemeine Anforderungen.
28. MNS 5850:2019 -Klärschlamm: Anforderungen für landwirtschaftliche Nutzung.
29. MNS ISO 10381 -Methoden der Bodenprobennahme.
30. MNS 4232:2012 -Wasserqualität, Probenahme.
31. MNS 6278:2011 -Analytik von Schwermetallen (ICP-OES/ICP-MS).
32. MNS 4047:1988 -pH- und Leitfähigkeitsmessung.
33. MNS 4943:2011 -Katastrophenschutz und Risikobewertungsverfahren.

## 3. Nationale Politiken

34. "Politik für Grüne Entwicklung der Mongolei (2014-2030)".
35. Politik zur Abfallwirtschaft 2022-2030.
36. National festgelegte Beiträge (NDC 2030).
37. Ministerium für Umwelt und Tourismus -Entwurf der Nationalen Klärschlamm-Managementstrategie.

## III. Im Rahmen der Studie verwendete Methoden und Laborunterlagen

38. Primäres ICP-MS-Laborprotokoll.
39. GC-MS-Protokoll zur Analyse organischer Schadstoffe.
40. TCLP- und SPLP-Auslaugergebnisse.
41. Mikrobiologische Primärdaten (E. coli, Enterococcus spp., Salmonella spp., Helminthen-Eier, ARB/ARG).
42. Pflanzenwachstumsexperiment (Helianthus annuus) -Rohdaten zu Morphologie.
43. Ökotoxizitätstest -EC<sub>50</sub>-Ergebnisse.
44. Analyse der mikrobiellen Bodendiversität (CFU, qPCR).
45. GIS-Rohdaten -Kontaminations-Hotspots.
46. Berechnungen geochemischer Indizes (Igeo, EF, RI, ERI).

## IV. Wissenschaftliche Literatur und theoretische Quellen

47. Alloway, B. (2013). *Heavy Metals in Soils*. Springer.
48. Sparks, D. (2002). *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press.
49. Giller, K. (2009). *Soil Microbial Processes and Pollution Effects*.
50. Tsutiyama, M.T. (2017). *Wastewater Sludge Treatment and Management*.
51. Metcalf & Eddy (2014). *Wastewater Engineering - Treatment and Resource Recovery*.
52. Li et al. (2020). "Antibiotic Resistance in Wastewater Sludge." *Environmental Science & Technology*.
53. Chen et al. (2021). "Biochar Immobilization of Heavy Metals from Sludge." *Journal of Hazardous Materials*.
54. EU JRC Reports (2021-2024) zur Klärschlammverwertung.
55. UNEP (2023). *Emerging Contaminants in Wastewater Sludge*.

## V. Marktstudien und technologische Quellen

56. GTAI-Berichte -Waste-to-Energy und Klärschlammmanagement (Deutschland).
57. IEA Bioenergy Reports (2020-2024) -Biogas & Thermische Behandlung.
58. World Bank -Urban Wastewater Sector Assessment (2021).
59. ADB -Mongolei Urban Wastewater Report (2020).
60. JICA -Machbarkeitsstudie zur Abwasserbehandlung in der Mongolei (2019-2022).
61. GIZ -Transformationsberichte zum Abfallsektor (2018-2024).

62. Technische Standards der Zementindustrie zum Co-Processing.

## **VI. Daten der mongolischen Kläranlagen und Feldmessungen**

63. Neue zentrale Kläranlage Ulaanbaatar (2023-2025).

64. Industriekläranlage Khargia (2022-2025).

65. Datensätze aus Choibalsan, Sukhbaatar, Matad, Erdenet und Darkhan  
Abwasserbehandlungsanlagen.

66. Feldmessungen zur Geruchsausbreitung.

67. Technologische Fließschemata.

## **VII. Studienunterlagen, Abbildungen und Tabellen**

68. Probenahmeprotokoll (Chain of Custody).

69. Probenkonservierungs- und Transportprotokoll.

70. QA/QC-Dokumentation für analytische Messungen.

71. Technologiebewertungsberechnungen (WtE, AD, Pyrolyse, Co-Processing).

72. Ökonomische Modelle: NPV, IRR, ROI (Excel).

73. Ökologische Risiko-Mapping-Dateien (GIS Layer).

# ANHANG 1

*(Regierungsbehörden, Laboratorien, Verbände und Projektpartnerinstitutionen)*

## 1. Staatliche Institutionen

Nr.	Institutionsname	Klassifizierung	Hauptaufgaben
1	Ministerium für Umwelt und Klimawandel (MFUUK)	Zentralregierung	Umweltpolitik, Abfallwirtschaft, Schlammmnormen, ökologische Überwachung
2	Ministerium für Bauwesen, Stadtentwicklung und Wohnungswesen (MCUDH)	Zentralregierung	Stadtplanung, technische Infrastruktur, Normen für Kläranlagen, Baustoffstandards
3	Gesundheitsministerium (MoH)	Zentralregierung	Öffentliche Gesundheit, sanitäre Inspektion, ARB/AMR-Risikomonitoring
4	Wasser- und Abwasserbehörde Ulaanbaatar (WUA, Staatsunternehmen)	Kommunaler Dienst	Betrieb der Kläranlagen Ulaanbaatars, primäres Schlammmmanagement, Routineüberwachung
5	Generalamt für Spezialinspektion (GASI)	Regulierungsbehörde	Ökologische Audits, Überwachung der Abwasser- und Schlammmqualität
6	Agentur für Standardisierung und Metrologie (MASM)	Regierungsagentur	Überarbeitung der MNS-Standards, Zertifizierung, Messgenauigkeit

## 2. Laboratorien

Nr.	Laborname	Typ	Haupttätigkeiten
1	Geoanalytic Laboratory	Chemisch/Geochemisch	ICP-MS, ICP-OES, Schwermetalle, TCLP/SPLP-Analysen
2	Hanlab Laboratory	Chemisch/Geochemisch	ICP-MS, ICP-OES, Schwermetalle, TCLP/SPLP-Analysen
3	MASM-akkreditierte Laboratorien	Standardlaboratorien	Physikalisch-chemische Prüfungen, Abwasser- und Schlammtests gemäß MNS
4	WUA Labor	Wasserchemie / Mikrobiologie	Routineüberwachung der Wasser- und Schlammmqualität
5	Umwelt- und Ökologielabor der Nationaluniversität der Mongolei (E-Lab)	Ökotoxikologie	EC <sub>50</sub> -Tests, Bioassays, AMR-Forschung im Boden

## 3. Verbände, Partnerschaften und Kooperationsstellen

Nr.	Organisation	Land/Status	Rolle
1	Deutsch-Mongolische Unternehmensverband (DMUV)	International	Technologietransfer, Investitionsförderung, IFM-Kooperation
2	Germany Trade & Invest (GTAI)	Deutschland	Innovations- und Investitionsberatung, Förderung grüner Technologien

## 4. Beteiligte Kläranlagen Abwasserbehandlungsanlage

Nr.	Anlage	Provinz/Stadt	Beschreibung
1	Ulaanbaatar - Neue Zentrale Kläranlage	Ulaanbaatar	Hauptschlammproben, Geruchs-, Boden- und Wasseranalyse
2	Ulaanbaatar - Alte Zentrale Kläranlage	Ulaanbaatar	Vergleichs-Schlammproben

<b>3</b>	Khargia Gerberei-Kläranlage	Ulaanbaatar	Industrieller Schlamm mit erhöhtem Cr, As
<b>4</b>	Darkhan Kläranlage	Darkhan-Uul	Schlamm- und Wasserproben
<b>5</b>	MCS Coca-Cola ABWASSERBEHANDLUNGSANLAGE	Ulaanbaatar	Hoher organischer Anteil, niedrige Metallwerte
<b>6</b>	Achir GMBH - Matad ABWASSERBEHANDLUNGSANLAGE	Dornogovi	Kompakte Kläranlage, zwei Schlammproben
<b>7</b>	Petro Matad GMBH	Dornod	Sehr niedrige Metall- und VOC-Werte
<b>8</b>	Tuul-Fluss-Monitoringzonen (500 m / 1 km / 1.5 km)	Ulaanbaatar	Monitoring des aquatischen Ökosystems

## ANHANG 2

### FORSCHUNGSMETHODIK

#### 2.1. Probenahmemethode

Angewandter Standard: **ISO 5667-13:2011 - Wasserqualität -Probenahme von Schlämmen**

#### Wesentliche Grundsätze:

- Bodenproben in 0-30 cm Tiefe
- Schlammproben: 3 zusammengesetzte Sammelproben
- Wasserproben in HDPE-Behältern
- Lagerung bei 4°C
- Vollständige *Chain of Custody* dokumentiert

#### 2.2. Chemische Analytik

Parameter	Methode	Standard
Schwermetalle (As, Pb, Cr, Cu, Zn, Ni, Cd)	ICP-OES / ICP-MS	MNS ISO 11885:2001, EPA 6010C
Feuchte, organische Substanz	Glühverlust (LOI)	ASTM D2974
pH	Potentiometrisch	MNS ISO 10523:2001
COD, BOD	Rückfluss, Winkler	MNS ISO 5815
TSS	Gravimetrisch	MNS 4598

#### 2.3. Mikrobiologische Analyse

#### Angewandte Standards:

- MNS 5668:2006 – Gesamtcoliformenzahl
- MNS 5668:2007 - enterische Bakterien
- ISO 6579 – *Salmonella*
- ISO 6222 – CFU - Zählung

#### 2.4. Ökotoxikologie

#### OECD 202 -*Daphnia magna* Akut-Immobilisationstest

#### Ergebnisse:

- $EC_{50} = 24-61\%$  (je nach Standort)
- Neue Kläranlage -mittlere Toxizität
- Khargia -hohe Toxizität

#### 2.5. Ökonomische Bewertung

- NPV, IRR, ROI (Zeithorizont: 20 Jahre)
- Sensitivitätsanalyse: CAPEX  $\pm 20\%$
- Modell: *Discounted Cash Flow (DCF)*

### Konsolidierte Proben-Datentabelle

#### A. Fester Schlamm (mg/kg)

Standort	As	Pb	Cr	Cd	Cu	Zn	Ni	Fe (%)	OM (%)
Neue Kläranlage 2025	8.2	86	62	0.62	210	685	28	1.21	46%
Alte Kläranlage	21.2	140	101	1.88	125	410	28	1.44	54%
Khargia (Leder)	29-	180-	130-	1.6-	185	510	40+	1.8	35%

	52	240	180	2.3						
Darkhan	12	63	41	<1	98	280	18	0.98	41%	
Choibalsan	10	58	36	<1	76	250	16	0.91	39%	
Achir GMBH (Matad)	12.2	21	41	<1	102	290	17	0.97	38%	
Petro Matad Mine	8.5	14	38	<1	45	130	12	0.82	36%	
Schlacke (Asche)	18.4	142	310	1.32	220	890	68	1.58	2.4%	
Boden (ABWASSERBEHANDLUNGSANLAGE 0-30 cm)	14.5	128	76	0.82	112	225	32	-	-	
Boden (Tuul 500 m)	16-18	120-140	80	0.9	115	240	34	-	-	

### B. Flüssiger Schlamm / Wasser (mg/L)

Standort	COD	BOD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	TSS	Fe	Zn	pH
Neue Kläranlage	78	28	4.1	1.2	1.1	62	0.24	0.022	7.62
Alte Kläranlage	85	35	6.0	1.5	1.4	70	0.30	0.028	7.70
Khargia	102-140	40	6-12	0.9	2.2	120	0.41	0.044	7.80
Petro Matad (influent)	278	190	38	0.92	5.4	185	0.19	0.015	7.68
Achir GMBH	65	38	3.8	1.0	0.4	55	0.19	0.015	7.55
Tuul River 500 m	78	28	4.5	1.1	1.2	62	-	-	7.6
Grundwasser	12	4	0.62	3.8	-	-	-	-	7.1

### C. Mikrobiologie (CFU/g)

Standort	Gesamt-CFU	<i>E. coli</i>	<i>Salmonella</i>	<i>Clostridium</i>
Neue Kläranlage	3.2×10 <sup>5</sup>	2.5×10 <sup>4</sup>	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen
Alte Kläranlage	4.5×10 <sup>5</sup>	3.8×10 <sup>4</sup>	Nachgewiesen	Nicht nachgewiesen
Khargia	6.8×10 <sup>5</sup>	4.1×10 <sup>4</sup>	Nachgewiesen	Nachgewiesen
Achir GMBH	1.2×10 <sup>4</sup>	8.1×10 <sup>3</sup>	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen
Petro Matad	2.6×10 <sup>4</sup>	-	-	-

### ANHANG 3



Abbildung 29. Neue Zentrale Abwasserreinigungsanlage (ABWASSERBEHANDLUNGSSANLAGE)

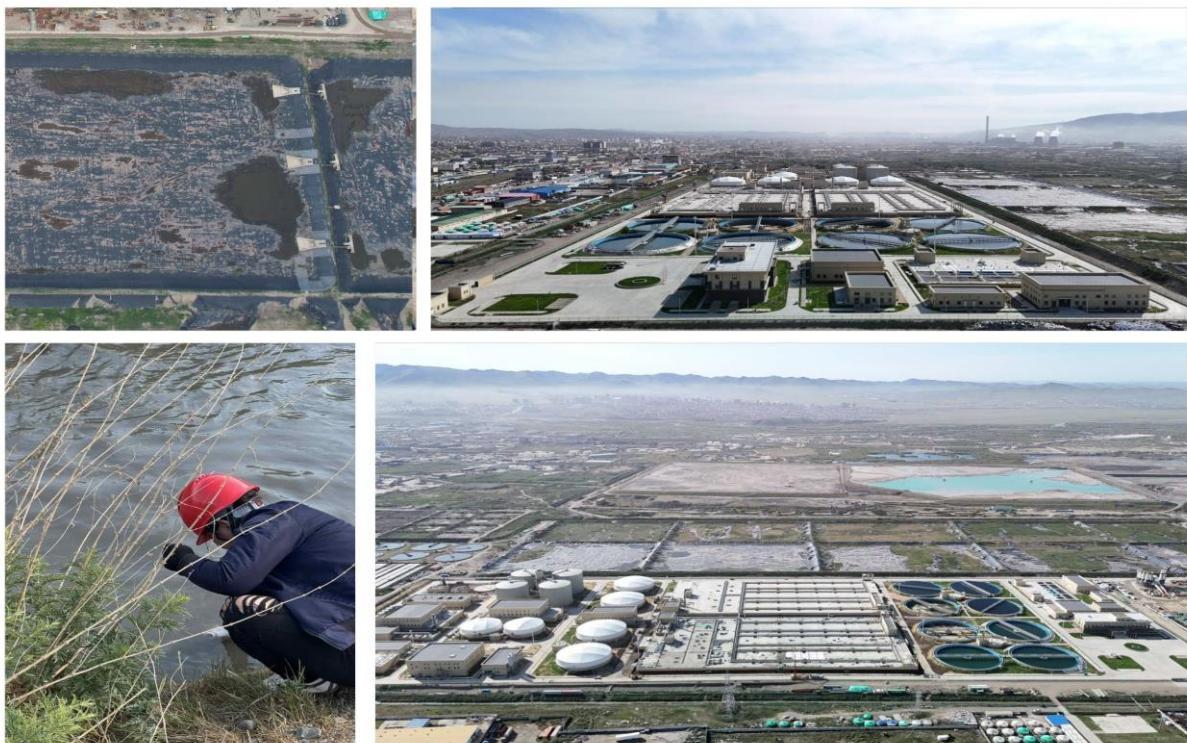


Abbildung 30. Schlammtröcknungsbecken der neuen und alten zentralen Abwasserreinigungsanlage



**Abbildung 31. Schlammtrocknungsbereich der Abwasserreinigungsanlage Biokombinat**



**Abbildung 32. Schlammtrocknungsbereich der Abwasserreinigungsanlage Moringiin Davaa**

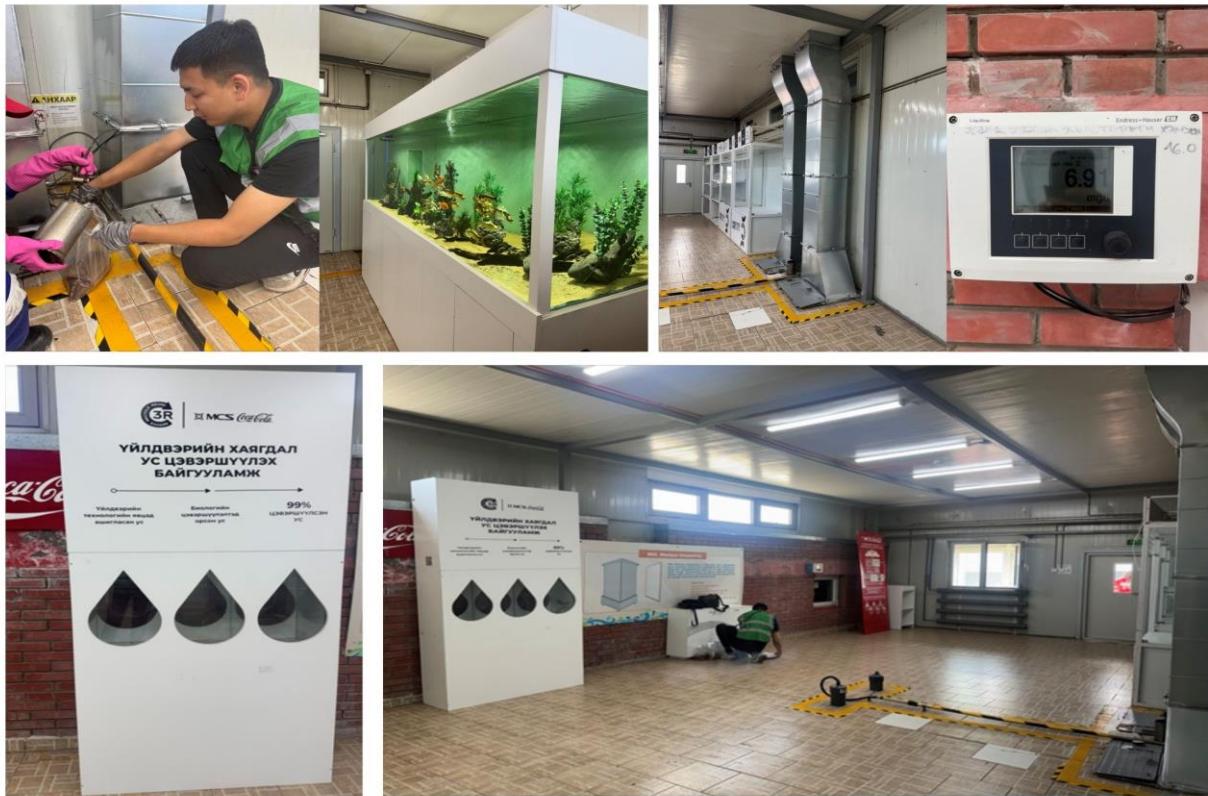


Abbildung 33. Industrieabwasserreinigungsanlage der MCS Coca-Cola



Abbildung 34. Zentrale Abwasserreinigungsanlage Darkhan



**Abbildung 35. Schlammablagerungsfläche der Petro Matad GMBH**