

# **Fernerkundung des Deponieverhaltens mit dem Thermalscanner**

## **Darstellung der Methode und Ergebnisse am Beispiel der Deponie Eichelbuck/Freiburg**

Studie der Stadt Freiburg im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr  
Baden-Württemberg

Bearbeiter:

**Henseleit & Partner GdBRmbH**  
Ingenieurbüro für Abfalltechnik und Altlastsanierung  
79117 Freiburg

## Inhalt

### Einführung 1

- 1 Ausgangspunkt FID-Messungen und allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise 2
- 2 Aufnahme und geometrische Korrektur der Thermaldaten 4
- 3 Darstellung, Überlagerung und Klassifikation der Thermaldaten 4
- 4 Überlagerung der Thermaldaten mit anderen Datenebenen 7
- 5 Datenanalyse und Interpretation der Ergebnisse 8
- 6 Vergleich mit 1997, Maßnahmen und Erfolgskontrolle 14
- 7 Fazit und weiterer Untersuchungsbedarf 15

### Anlagen

- 1 Thermalkarte Abend 1998
- 2 Thermalkarte Morgen 1998
- 3 FID-Messungen
- 4 Temperaturdifferenzkarte Abend-Morgen 1998
- 5 Klassifizierte Thermalkarte 1998
- 6 Karte der Wärme- und Kälteanomalien 1998
- 7 Karte der Veränderungen der extremen Wärmebereiche 1997/98
- 8 Karte der Veränderungen der extremen Kältebereiche
- 9 Temperaturdifferenzkarte Abend 1998-1997
- 10 Temperaturdifferenzkarte Morgen 1998-1997
- 11 Klassifizierte Thermalkarte 1998 (3D-Darstellung)
- 12 Temperaturverhalten im Deponiekörper

## Einführung

Im Rahmen einer vom Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg geförderten Studie wurden die Möglichkeiten der Fernerkundung des Deponieverhaltens mit dem Thermalscanner untersucht. Der ausführliche, im Juli 1998 erstellte Bericht beschreibt die Anwendung der entwickelten Methoden am Beispiel der Freiburger Deponie Eichelbuck<sup>1</sup>. In der vorliegenden Kurzfassung sind die wichtigsten Ergebnisse für die Anforderungen nach TA Abfall und TA Siedlungsabfall zusammengefasst.

Die Aufgabenstellung der Studie war, mit Hilfe einer Thermalscannerbefliegung das Oberflächentemperaturverhalten flächendeckend zu erfassen und hauptsächlich auf Ausgasungsbereiche hin zu bewerten. Dabei wurden bislang zwei Befliegungen (Frühjahr 1997 und Frühjahr 1998) durchgeführt. Die Ergebnisse der Befliegungen wurden in Bezug auf Änderungen oder neue Phänomene miteinander verglichen. Dabei ist besonders von Interesse, ob die auf der Deponie durchgeführten Maßnahmen zu Verbesserungen geführt haben (Erfolgskontrolle).

Schwerpunkt der Analyse der gewonnenen Thermalbilddaten war der Nachweis von Ausgasungen und zusätzlich von Wasseraustritten und Feuchtstellen, exothermen Reaktionen, Kaltluftsammlung und Kaltluftabflüssen. Es stellte sich insbesondere die Frage, inwieweit die neue Methode den Aufwand für das klassische FID-Meßverfahren ersetzen kann (siehe hierzu das Fazit in Abschnitt 7). Insgesamt ergibt die Studie, dass die Fernerkundung mit dem Thermalscanner für die Beurteilung des Deponieverhaltens wesentliche Aufschlüsse enthält. Der Nachweis der untersuchten Phänomene konnte explizit geführt werden. Die flächendeckende Darstellung führt so zu wichtigen Erkenntnissen für die weitere Gestaltung einer Deponie in ihrer aktiven Phase. Die Methode geht damit über die Anforderungen einer Kontrolle mit FID-Messungen weit hinaus. Sie ist wohl derzeit die einzige Methode, die ein umfassendes und nachvollziehbares Bild des Deponieoberflächentemperaturverhaltens und damit in weiten Bereichen auch des Deponieverhaltens liefert.

Die bei der Fernerkundung mögliche Kombination von Thermalscanneraufnahme, Photogrammetrie und Bodenmessungen bietet sowohl inhaltliche als auch finanzielle Vorteile. Durch die Fernerkundung lässt sich der Umfang der Bodenmessungen reduzieren, es können kritische Punkte lokalisiert werden und auf großflächige Maßnahmen, z.B. die Schaffung von Schneisen im Bewuchs für FID-Messungen an unzugänglichen Stellen, kann weitgehend verzichtet werden. Die Möglichkeit einer parallelen Thermal- und Luftbildbefliegung kann ebenfalls Kosten sparen. Überdies liefert die Überlagerung von Thermaldaten, Nutzungs- und Reliefdaten eine Fülle von flächendeckenden Informationen über das Deponieverhalten und den Zustand der Umgebung.

<sup>1</sup> Henseleit & Partner, SPACETEC; Fernerkundung des Deponieverhaltens mit dem Thermalscanner. Darstellung der Methoden und Ergebnisse am Beispiel der Deponie Eichelbuck/Freiburg; Freiburg 1998

# 1 Ausgangspunkt FID-Messungen und allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise

## Veranlassung

Nach TA Siedlungsabfall, Anhang C, Punkt 6. "Wirkungskontrollen der Entgasung" müssen zumindest 2 Fremdkontrollen pro Jahr mittels FID sowohl für offene, als auch für endabgedeckte und abgedichtete Deponien oder Deponieabschnitte durchgeführt werden. Damit wird die Wirksamkeit der aktiven Entgasung auf der Deponieoberfläche und im Randbereich überprüft.

Die FID-Messungen bei Deponien > 10 ha werden üblicherweise im 20m-Raster durchgeführt. Der baden-württembergische Leitfaden zur Überwachung des Betriebs von Siedlungsabfalldéponien vom Februar 1999 sieht einen Abstand von maximal 25m x 25m vor. In Nordrhein-Westfalen wird in Technischen Anhängen zur Deponieselbstüberwachungsverordnung ein Messpunkt auf bis zu 625 m<sup>2</sup> vorgesehen. Entsprechend der jeweiligen Deponiegeometrie und aufgrund von Auffälligkeiten kann eine Messpunktverdichtung erforderlich sein.

Die Durchführung einer Messaktion verlangt oft einen hohen Aufwand für die Einrichtung des Rasters und für die Begehung der Messpunkte - insbesondere bei mit Buschwerk oder dichten Anpflanzungen bestandenen Böschungen. Unbefriedigend ist dabei, dass der Aufwand immer wieder für den gesamten Deponiebereich getrieben werden muss, obwohl in der Regel in weiten Bereichen keine oder nur vernachlässigbar geringe Ausgasungen stattfinden, Unbefriedigend ist aber auch, dass zwischen den Rastermesspunkten Ausgasungen übersehen werden können.

Um hier eine wesentliche Verbesserung zu schaffen, haben HENSELEIT & PARTNER und STEINICKE & STREIFENEDER dem EIGENBETRIEB ABFALLWIRTSCHAFT der Stadt Freiburg empfohlen, die Ausgasungsbereiche auf der Deponie Eichelbuck gezielt durch Fernerkundung mit einem Thermalscanner zu ermitteln. Nachdem eine erste Aktion 1997 vielversprechend verlief, wurde 1998 eine verfeinerte zweite Aktion durchgeführt, die wegen ihrer Allgemeingültigkeit vom Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg gefördert wurde, dem an dieser Stelle Dank gesagt sei.

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben am Beispiel der Deponie Eichelbuck die Vorgehensweise und die dadurch erzielten Ergebnisse. Eine Empfehlung für die weitere Anwendung schließt sich an.

## Deponiebeschreibung und Chronologie der Vorgehensweise

Die Deponie Eichelbuck ist eine Hügeldeponie, wie sie mehrfach im Land vorkommt. Sie wird seit 1972 betrieben und umfasst gegenwärtig ein Müllvolumen von über 5 Mio. m<sup>3</sup>. 1994/95 wurde eine konventionelle flächendeckende FID-Messung gemäß TA Siedlungsabfall durchgeführt. Wegen der Deponiegröße auf 22,5 ha Grundfläche, mit einer Böschungsfläche von ca. 15 ha, waren nahezu 1000 Messpunkte erforderlich. Zur Durchführung der Messungen mussten Trassen in die z.T. stark bewachsenen Böschungen geschlagen werden. Gangbarmachung und Messung mussten mehrfach wegen Schlechtwettereinbruch unterbrochen werden und zogen sich mit Unterbrechungen über 4 Monate hin.

Die Messergebnisse zeigten sehr hohe Ausgasungen (z.T. > 10.000 ppm) in einigen Böschungsbereichen an. Auf der Betriebsfläche lagen die Ausgasungen fast ausschließlich noch unter 1.000 ppm. In den übrigen Bereichen waren sie sehr gering (< 100 ppm) oder nicht vorhanden (s. Anlage 3).

Aufgrund dieser Ergebnisse hat der Betreiber verschiedene Maßnahmen ergriffen, die zu einer erheblichen Reduktion der Ausgasungen geführt haben. Zur Eingrenzung der unbedingt per FID-Messung zu kontrollierenden Deponiebereiche und zur Aufwandsreduzierung wurde dann 1997 die erste Thermalscannerbefliegung in Auftrag gegeben und durchgeführt und dabei die Wirkung der zuvor getroffenen Maßnahmen überprüft.

Über das erhoffte Ergebnis zur Eingrenzung von Ausgasungsstellen hinaus, konnten durch die Sichtbarmachung des Oberflächentemperaturverhaltens weitere Informationen hinsichtlich Feuchtestellen, Wasseraustrittsbereiche, Kaltluftabflüsse und besondere thermische Emissionen von speziellen Betriebsaktivitäten gewonnen werden. Der Umfang der Erkenntnisse war daraufhin Anlass, den Ergebnisbericht in die Erklärung zum Deponieverhalten zu integrieren und die FID-Messung auf 150 Messpunkte zu beschränken.

Durch die FID-Messung konnte ein starker Rückgang der Ausgasungen gegenüber der vorigen Messung nachgewiesen werden. Der höchste Messwert lag an der Südböschung bei 2.000 ppm. Der Betreiber hat daraufhin weitere Nachbesserungen gezielt vornehmen können.

Die nun 1998 durchgeführte Thermalscannerbefliegung konnte deshalb um den Aspekt der Erfolgskontrolle von Sanierungsmaßnahmen erweitert werden. Weitere Aspekte, wie die Eingrenzung von Bereichen mit Geruchsemissionen und die Optimierung einer emissionsarmen Betriebsgestaltung deuten sich an. Ferner hat eine verfeinerte Auswerte- und Darstellungstechnik dazu geführt, dass die Eingrenzung und Zuordnung von Bereichen für die nächste FID-Messung noch genauer gezogen werden konnte.

## 2 Aufnahme und geometrische Korrektur der Thermaldaten

Die Thermalscannerbefliegungen der Deponie Eichelbuck wurden am 30. und 31.03.1998 während einer windschwachen Strahlungswetterlage durchgeführt (Daten s. Tab. 1). Aufnahmegerät war ein flugzeuggestützter Scanner, der die Wärmestrahlung im thermischen Infrarot aufzeichnet.

Tab. 1 Angaben zu den Thermalscanneraufnahmen der Deponie Eichelbuck

Aufnahme	30.03.1998 / 19:50 - 20:15 Uhr (Abendaufnahme) 31.03.1998 / 6:50 - 7:00 Uhr (Morgenaufnahme)
Gebietsgröße	ca. 1 km x 0,7 km
Flughöhe	ca. 400 m über Grund
Anzahl Flugstreifen	jeweils 2
Querüberlappung	ca. 40%
Bodenauflösung	ca. 1 m
Referenztemperaturen ("black-bodies")	Abend: T1 = 8°C, T2 = 20°C Morgen: T1 = - 2°C, T2 = 14°C

Für die geometrische Entzerrung der Bildstreifen wurden die aktuelle digitale Topographische Karte und ein aktuelles Senkrecht-Luftbild (beides hergestellt von der Badischen Luftbildmessung, Freiburg) verwendet.

Die geometrische Entzerrung (Rektifizierung) erfolgte in folgenden Schritten:

- Panoramakorrektur der einzelnen Bildstreifen (Flugstreifen); hierbei wird die Zylindergeometrie der Scanneraufzeichnung auf die Ebene projiziert
- Entzerren der Bildverbände auf die digitale TK mittels Passpunkten und Geocodierung; hierzu wurde das Programm "ER Mapper" verwendet (Rektifizierung mit Triangulationsverfahren)
- Zusammenfügen der Bildstreifen ("mosaiking"), das Ergebnis wird als Bildverband bezeichnet

## 3 Darstellung, Überlagerung und Klassifikation der Thermalbilddaten

Aus den entzerrten und geocodierten Thermalbilddaten entstehen Datenprodukte, die für die Analyse und Interpretation von Bedeutung sind. Einige dieser Produkte sind im Rahmen des Projekts entwickelt worden. Dabei wurden das Bildverarbeitungsprogramm "ER Mapper", das Geographische Informationssystem (GIS) "ArcView", das Datendarstellungsprogramm "Surfer" sowie eigene Programme verwendet. Die im Folgenden genannten Karten sind als farbige A3-Abbildungen enthalten.

## Thermalkarte Abend 1998 (Anlage 1), Thermalkarte Morgen 1998 (Anlage 2)

In diesen Karten ist jedem Bildelement (Pixel) ein Grauwert im Bereich von 0 bis 255 zugeordnet. Den Grenzwerten 0 und 255 entsprechen die in Tabelle 1 genannten Referenztemperaturen ("black-bodies" T1, T2), daraus lässt sich für jeden Grauwert eine Oberflächentemperatur berechnen. Um feinere thermische Details zu zeigen, werden die Daten kontrastverstärkt, d.h. die Temperaturgrenzen sind enger gesetzt. Für die Differenzierung der Temperaturklassen ist eine einheitliche Farbcodierung gewählt.

Die Referenztemperaturwerte sind so gewählt, dass nahezu alle auftretenden Strahlungstemperaturen innerhalb des Bereiches erfasst werden. Ausnahmen bilden stark reflektierende Flächen (z.B. glänzende Metalloberflächen, Metalldächer, Glas), die einen sehr geringen Emissionskoeffizienten ( $\epsilon$ ) besitzen. Die zugehörigen Grauwerte haben den Wert 0 (im Thermalbild schwarz), die aufgenommene Strahlungstemperatur weicht stark von der wahren Oberflächentemperatur ab.

Aufgrund der nächtlichen Ausstrahlung liegen die Oberflächentemperaturen der Morgenaufnahme deutlich unter denen der Abendaufnahme. Auch die erreichten Maxima und Minima sind unterschiedlich. Über Nacht gleichen sich die Temperaturen an, so dass die Dynamik der Morgenaufnahme geringer ist, als die der Abendaufnahme. Während abends die durch Einstrahlung bestimmten Effekte dominieren, zeigen sich morgens mehr die inneren Wärmequellen.

## Temperaturdifferenzkarte Abend-Morgen 1998 (Anlage 4)

Bei der Temperaturdifferenzkarte wird die Abkühlung (in K) zwischen der Abend- und Morgenthermografie für jedes Pixel berechnet. Dabei ist zu beachten, dass die Zuordnung der Grauwerte (0 bis 255) der Abend- und Morgendaten zu realen Temperaturen anhand der "black-body"- Temperaturen T1, T2 erfolgt. Dies sind Referenztemperaturen, die während der Befliegung ermittelt wurden (Tabelle 1).

Eine detaillierte Darstellung des Abkühlungsverhaltens der Deponieoberfläche gibt Auskunft über die Wärmeabgabe (thermische Trägheit). So zeigt z.B. Wasser eine große thermische Trägheit und folglich zeichnen sich Feuchtstellen oder Wasserausstritte durch eine geringe Abkühlung aus (z.B. Kälteanomalien 3, 6, 9, 15, 18 und 23; s. Tab. 5 und Anlage 6). Ebenso kühlt stark reagierender Frischmüll (z.B. Wärmeanomalie 18; s. Tab. 4 und Anlage 6) kaum ab. Eine stärkere Abkühlung zeigen Stellen mit exponierter Vegetation (Westhang), die Mulchabdeckung am Südrand (Wärmeanomalie 7) oder die abgedeckte Kippfront (Wärmeanomalie 10).

## Klassifizierte Thermalkarte 1998 (Anlage 5)

Die Klassifizierte Thermalkarte entsteht aus der Überlagerung und Klassifikation der Abend- und Morgenthermografie. Für die Erstellung dieser Karte werden jedem Pixel aus der Abend- und Morgenaufnahme (Temperaturen T1 bzw. T2) eine mittlere Temperatur (Tm) und eine Abkühlung (dT) zugeordnet:

$$\text{mittlere Temperatur (in } ^\circ\text{C):} \quad T_m = \frac{1}{2} (T_1 + T_2)$$

$$\text{Abkühlung (in Kelvin):} \quad dT = T_1 - T_2$$

Das so berechnete Oberflächentemperaturverhalten wird anschließend in 12 Klassen unterschieden (4 Tm-Klassen und 3 dT -Klassen). Je nach Klassenzugehörigkeit wird eine bestimmte Farbe zugeordnet.

Während die Abkühlung ein Maß für die thermische Trägheit darstellt, gibt die mittlere Temperatur Aufschluss über die Dichte bzw. Wärmekapazität der obersten Bodenschicht. So zeichnen sich feuchte Stellen durch eine höhere Wärmekapazität und eine höhere thermische Trägheit aus. Dies führt zu einer niedrigen Temperatur und einer geringen Temperaturschwankung, d.h. es wird wenig Wärme aufgenommen und abgegeben. Bei dichten Bäumen und Sträuchern findet ein intensiver Wärmeaustausch mit der Luft statt, was zu einer hohen mittleren Temperatur und einer deutlichen Abkühlung führt. Wege und trockene Böden kühlen bei hinreichender Verdichtung kaum ab und bleiben auf einem hohen Temperaturniveau. Auch Ausgasungen sind durch hohe mittlere Temperaturen und geringe Abkühlung gekennzeichnet.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Klassifizierte Thermalkarte und deren Interpretation an hand von Nutzung und sichtbarer Oberflächenstruktur viele der im Deponiebereich wichtigen Phänomene erkennen lässt. Deren flächenhafte Darstellung ist derzeit mit keiner anderen Methode realisierbar.

#### Karte der Wärme- und Kälteanomalien 1998 (Anlage 6)

Diese Karte ist ein Extrakt aus der Klassifizierten Thermalkarte. Hierbei werden die potentiellen Ausgasungs- und Feuchtestellen, die durch geringe Abkühlung und hohe bzw. niedrige mittlere Temperaturen gekennzeichnet sind, gesondert auf dem Hintergrund des Luftbildes dargestellt. Damit wird die räumliche Zuordnung dieser Phänomene erleichtert. Durch eine genaue Analyse der in Frage kommenden Bereiche können viele Stellen als "normal" angesehen werden, d.h. ihr Thermalverhalten wird hauptsächlich weder durch Wasseraustritte noch durch Ausgasungen verursacht. Die eigentlichen Problemstellen werden einzeln dargestellt und beschrieben (siehe Abschnitt 5).

#### Karten der Veränderungen der extremen Wärmebereiche Kältebereiche 1997/98 (Anlagen 7 und 8)

Vergleicht man die Karten der Wärme- und Kälteanomalien von 1997 und 1998, so lassen sich Unterschiede feststellen. Die Karten gewähren einen Einblick in die Veränderungen durch den regulären Betrieb aber auch in die Effizienz der innerhalb eines Jahres durchgeführten Sanierungsmaßnahmen. Als Beispiel wird die Karte der Veränderung der extremen Wärmebereiche in Anlage 7 gezeigt (zur besseren Orientierung ist wieder das Luftbild hinterlegt). In unterschiedlichen Graustufen sind dargestellt: Bereiche, in denen keine Veränderungen aufgetreten sind, Bereiche, in denen 1998 neue Anomalien hinzugekommen sind und Bereiche, in denen 1998 Anomalien weggefallen sind, die 1997 vorhanden waren.

Temperaturdifferenzkarte Abend 1998-1997 (Anlage 9),  
Temperaturdifferenzkarte Morgen 1998-1997 (Anlage 10)

Eine besondere Herausforderung ist die Erstellung einer Temperaturdifferenzkarte zwischen Abend 1998 und Abend 1997 bzw. Morgen 1998 und Morgen 1997. Hierbei müssen die unterschiedlichen thermischen Situationen berücksichtigt werden. Bei der Befliegung von 1997 (Anfang Februar) war es generell kühler als bei der Befliegung 1998 (Ende März). Anhand der jeweiligen Referenztemperaturen muss ein thermischer Abgleich durchgeführt werden.

Ein Vergleich der Thermografien aus aufeinander folgenden Jahren zeigt deutlich die Veränderung des thermischen Deponieverhaltens bedingt durch Nutzungsänderungen oder Änderungen der Bodenstruktur, die absichtlich oder unabsichtlich auftreten.

#### 4 Überlagerung der Thermalbilder mit anderen Datenebenen

Die Analyse und Interpretation basiert auf der Überlagerung der Thermalbilder in ihren unterschiedlichen Darstellungen (s. Abschnitt 3) mit den anderen Datenebenen wie z.B. Luftbilder (aufgenommen von der Firma Badische Luftbildmessung, Freiburg), Bodenmessungen etc. (siehe folgende Tabelle 2). Die Digitale Topographische Karte ist allen Thermalbildern überlagert. Zusätzlich ist bei einigen Darstellungen auch das Senkrecht-Luftbild unterlegt.

Tab. 2 Liste der für die Interpretation der Thermaldaten wichtigen Datensätze und Aktivitäten

Datensatz/ Aktivität	Durchführung	Durchführungszeitraum
Digitale Topographische Karte	Badische Luftbildmessung	Mai 1998
Farbiges Senkrecht- und Schrägluftbild	Badische Luftbildmessung	März 1998
Digitales Höhenmodell	Badische Luftbildmessung	Mai 1998
FID-Messungen	Henseleit & Partner	1995, 1997
Bodentemperatur-, Lufttemperatur und Windmessungen	Henseleit & Partner	März 1998 (parallel zur Befliegung)
Farbaufnahmen im Gelände	SPACETEC	März 1 998 (im Anschluss an Befliegung)
Ortsbesichtigungen	Henseleit & Partner, SPACETEC	März-Juli 1998

Die folgende Aufstellung gibt dazu Beispiele mit den zugehörigen Interpretationsmöglichkeiten.

Überlagerung von

- Thermaldaten (Abend, Morgen, Differenz, Klassifikation) mit Luftbild (Anlage 4)
  - Lokalisierung von thermischen Anomalien (Ausgasung, Feuchte, exogenen Prozesse) incl. Langzeitbetrachtung (Anlagen 6 und 7)
- Klassifizierter Thermalkarte mit digitalem Geländemodell - in 3D-Darstellung - (Anlage 11)
  - Abflüsse kühler Luftmassen aufgrund von Relief und Oberflächentemperatur, Kaltluftsammlung in Senken
- Thermaldaten (Abend, Morgen) mit Plan der Gasbrunnen und Drainageschächte
  - Temperaturverhalten im Deponiekörper (Anlage 12)
- Klassifizierte Thermalkarte mit FID-Rastermessungen
  - Verifikation von Ausgasungen (Anlage 3)

## **5 Analyse der Daten und Interpretation der Ergebnisse**

Im Mittelpunkt der Analyse steht die Klassifizierte Thermalkarte (Anlage 5). Zunächst müssen die dargestellten Klassen A-M mit der Nutzung korreliert werden. Zusätzlich sind Einflüsse der Bodenbeschaffenheit, der Rauigkeit (Dichte und Höhe der Vegetation), des Reliefs und der Exposition zu berücksichtigen. Das Oberflächentemperaturverhalten lässt sich dadurch in den meisten Fällen erklären. Hierzu einige Beispiele.

Vegetationsflächen erscheinen meist in roten Farbtönen (Klassen B-C). Ursache hierfür ist warme Luft im Stammraum. Kann diese über Nacht entweichen, so kühlen diese Flächen stärker ab. Die Stärke der Abkühlung hängt von der Dichte und Höhe der Vegetation ab. Große Dichte/Höhe, z.B. bei Baumbestand, führt zu geringer Abkühlung, die sich in den roten oder sogar dunkelroten Farben zeigt (Klassen C bzw. B). Geringe Dichte/Höhe, z.B. die niederen Büschen, führt zu stärkerer Abkühlung, die sich in der hellroten Farbe zeigt (Klassen 0).

Überlagert sind noch Expositionseffekte, die sich im Vergleich von West- und Osthang zeigen. So ist der Westhang deutlich wärmer als der Osthang, Vegetation und Boden wurde wesentlich mehr Wärmestrahlung zugeführt. Die Asymmetrie zeigt sich daher hauptsächlich in der Abendaufnahme und in der Temperaturdifferenzkarte Abend-Morgen.

Eine solche Asymmetrie ist auch im Vergleich der östlichen und westlichen Fahrstraße zu sehen (Hauptzufahrt/Abfahrt für die Deponiefläche). Hier ist aber die Verdichtung des Bodens ausschlaggebend. Auf der Zufahrt (Bergfahrt) verkehren die beladenen Müllfahrzeuge und verdichten so den Boden stärker als bei der Abfahrt (unbeladener Zustand, Talfahrt), Verdichteter Boden wirkt als Wärmebrücke und zeigt eine hohe mittlere Temperatur und eine geringe Abkühlung.

Der See in der Südwestecke der Deponie tritt deutlich in der Klasse B (dunkelrot) hervor. Gewässer wärmen sich im Jahresverlauf zwar nur langsam auf, bleiben dann aber nahezu konstant auf einem hohen Temperaturniveau, die nächtliche Abkühlung ist dabei gering (im Sommer wird sogar die Klasse A erreicht).

Interessanter sind aber die Phänomene, die direkt mit den Deponieablagerungen und dem Zustand auf oder im Deponiekörper zu tun haben. Diese Phänomene zeigen sich als mehr oder weniger ausgeprägte Wärme- oder Kälteanomalien. Der klassische Fall eines inneren Brandherdes konnte hier nicht nachgewiesen werden. Die folgende Tabelle 3 zeigt die untersuchten Anomalien, die flächendeckend und in einer Momentaufnahme (man bedenke, dass sich der Zustand des Deponiekörpers fortlaufend verändert) nur mit der Klassifizierten Thermalkarte nachgewiesen werden können.

Tab. 3 Untersuchte Anomalien und ihr Temperaturverhalten

Anomalie	Phänomen	Oberflächen- temperaturverhalten	Farbcodierung	Problem
Wärme- anomalie	Ausgasung, Exotherme Reaktion	hohe mittlere Temperatur, geringe Abkühlung	Dunkelrot (Klasse B)	Verwechslung mit dichtem Bewuchs oder verdichtetem Boden
Kälte- anomalie	Feuchtsteile, Wasseraus- Tritt	niedrige mittlere Temperatur, geringe Abkühlung	Dunkelblau (Klasse K)	Verwechslung mit Kaltluftsammlung oder Kaltluftabfluß

Auf der Karte der Wärme- und Kälteanomalien (Anlage 6) sind die identifizierten Stellen eingetragen. Ebenso auf der Klassifizierten Thermalkarte. Hier kann das thermale Umfeld mit in Augenschein genommen werden. Hilfreich können auch in einigen Fällen Farbaufnahmen des Geländes sein.

## Wärmeanomalien

Diffuse, flächenhafte Ausgasungen sind nur schwer nachweisbar. In den meisten Fällen zeigen sich Stellen, die mit Boden-anomalien (Risse, Schüttkanten) zusammenhängen. Besonders markant sind auch die Umgebungen der Gasbrunnen, die gesondert betrachtet werden.

Tab. 4 Gefundene Wärmeanomalien

Nr.	Phänomen und Erläuterung
1	Ausgasung
2	Ausgasung
3	Ausgasung
4	Abgas von Fackel
5	Bäume oder Ausgasung
6	Miete auf Abdichtung (Prozesswärme aus zwischengelagertem Mulch)
7	Mulch auf Abdeckung; Rand entweder noch reagierende Mulchbereiche oder Ausgasung an Verdichtungskanten zwischen alter und neuer Abdeckung
8	Ausgasung am früheren Schüttrand
9	Grünkompostmiete (Prozesswärme)
10	Ausgasung an der abgedeckten Kippfront
11	Ausgasung an Spalten
12	Ausgasung
13	reagierender Mulch (Prozesswärme)
14	Ausgasung oder Büsche
15	Ausgasung oder Büsche
16	Ausgasung unter Stauhohizont
17	Ausgasung
18	reagierender Frischmüll (Ausgasung und Prozesswärme); geringe Abkühlung
19	Mulch / Ausgasung
20	Ausgasung an Böschung (Straße?)
21	Ausgasung oder Büsche

## Kälteanomalien

Die meisten Kälteanomalien (vgl. Tabelle 5) sind auf Feuchte zurückzuführen. Besonders interessant sind Feuchtstellen im Hangbereich, vor allem im Hinblick auf den Zustand und die Wirksamkeit des Drainagesystems (Sickerwasseraustritte).

Es zeigt sich eine gewisse West-Ost-Asymmetrie in der Feuchte, die vermutlich historische Ursachen hat. Im östlichen Hangbereich ist der Boden am Unterhang poröser, so dass ein größerer Wasserfluss möglich ist.

Feuchtstellen kommen neben den Hangbereichen auch in ebenen Bereichen auf der Deponiefläche oder im Umfeld vor. Hier tritt z.T. ein hoher Grundwasserstand auf und/oder Wasser aus Austrittsstellen der Deponie sammelt sich an.

Tab. 5 Gefundene Kälteanomalien

Nr.	Phänomen und Erläuterung
1	Feuchte Böschung (z.T. Grasflächen) und feuchte Wege
2	Feuchte Böschung, evtl. Wasseraustritt (Zusammenhang mit Nr. 4)
3	Feuchte Böschung; Mix mit Kaltluftabfluss
4	Feuchte Böschung; Zusammenhang mit Nr. 2
5	Feuchte Grasfläche mit Baum im Zentrum (roter Fleck auf Klassifizierter Thermalkarte)
6	Feuchte Mulde; Mix mit Kaltluftsammlung
7	Feuchter Hangbereich; Wasseraustritt im Sanierungsbereich
8	Schachtsanierung (3 Stellen); evtl. Wasseraustritt
9	Feuchte Mulde; Kaltluftsammlgebiet
10	feuchtes Holz (7); evtl. Mix mit Kaltluftsammlung
11	feuchte Mulde; Kaltluftsammlgebiet
12	anormal kalte Stelle; feuchtes gehäckseltes Holz (evtl. Mix mit Kaltluftsammlung)
13	diffuser Wasseraustritt am Hang
14	diffuser Wasseraustritt am Hang
15	diffuser Wasseraustritt am Hang
16	Abführung von Oberflächenwasser; westlich anschließend liegt außerhalb der Deponie ein Gebiet mit hohem Grundwasserstand (vgl. Klassifizierte Thermalkarte)
17	Feuchter Hangbereich; evtl. Wasseraustritt
18	Feuchter Hangbereich (Zusammenhang mit Nr. 19)
19	feuchte Senke; erzeugt Wasserdruck (Ursache für Nr. 18); Mix mit Kaltluftsammlung
20	Feuchte Böschung
21	Feuchtes Senkloch
22	Feuchter Hangbereich; evtl. Mix mit Kaltluftabfluss; westlich anschließend liegt außerhalb der Deponie ein Gebiet mit hohem Grundwasserstand (Vgl. Klassifizierte Thermalkarte)
23	Sammlung von abgeführtem Oberflächenwasser auf lehmigem Grund; evtl. Mix mit Kaltluftsammlung

Hinweise auf Kaltluftabflüsse ergeben sich aus der Überlagerung der Thermaldaten mit dem digitalen Geländemodell (s. Anlage 11) sowie den Bodenmessungen. Voraussetzung ist eine ausreichende Hangneigung und geringer Bewuchs. Kaltluftabflüsse zeigen sich an niedrigen Temperaturen im Hangbereich. Am Nord-, Süd- und Westhang wurden Bereiche für Kaltluftabflüsse gefunden. Insbesondere am Nordhang treten größere Temperaturdifferenzen auf, da sich die Abflüsse meist in der zweiten Nachthälfte maximal ausprägen.

## Temperaturverteilung an den Drainageschächten und Gasbrunnen

Die Temperaturen an den Drainageschächten und Gasbrunnen erlauben Rückschlüsse auf die thermische Struktur im Deponieinneren. An den Schächten ergibt sich eine punktuelle Temperaturerhöhung, wenn Wärme nach oben geführt wird (Aufheizung der Abdeckung oder "hot spot" ist sichtbar, falls der Schacht oben offen ist). Ursache für eine solche Wärmequelle kann eine mangelhafte Abdichtung sein. Einige Gasbrunnen sind überdies noch nicht angeschlossen, so dass diffuse Gasemissionen im Umfeld auftreten können. In einigen Fällen kommt es aber auch durch Feuchteinfluss zu einer anormal tiefen Temperatur an den Schächten, dies ist gerade im Randbereich der Deponie zu beobachten und korreliert gut mit den dort gefundenen Kälteanomalien.

Anhand der Abend- und Morgenaufnahme wurden die mittleren Temperaturen an 72 Drainageschächten und Gasbrunnen bestimmt. Die Lage der Schächte und deren Zuordnung ergibt sich aus dem Deponieplan (s. Anlage 3). Die meisten Schächte sind auf den Thermalaufnahmen als Temperaturanomalien sichtbar. Die große Anzahl der Messpunkte erlaubt eine flächenhafte, interpolierte Darstellung.

Die Darstellung der mittleren Temperatur zeigt eine Temperaturspanne von ca. 6 K und korreliert kaum mit der Oberflächentemperatur. Besonders kühle Stellen ( $< 10^{\circ}\text{C}$ ) zeigen sich in den östlichen Randbereichen BF1, BF3 und R2, sowie bei BF8 (Nordwestrand) und R 18 (Südwestrand). Hier liegen, wie bereits diskutiert, feuchtete Bereiche. Warme Punkte liegen hauptsächlich auf der Deponiefläche. Extremwerte ( $> 1.5^{\circ}$ ) werden bei NT2, NT3, NT4, NF3, NF7, NF8, BT2 und BT9 erreicht. Die Gasbrunnen NT2, NT3 und BT2 sind noch nicht abgedichtet. Bei den weiter westlich liegenden Gasbrunnen BF9 und NF7 ist eine Abdichtung bereits erfolgt. Die Temperaturen sind hier ca. 4 K niedriger.

Bei den Drainageschächten (S1 bis S12) zeigt sich im Vergleich mit 1997 ein interessantes Bild (s. Abb. 1). Der prinzipielle Kurvenverlauf ist zwar ähnlich (maximale Werte bei S7 bis S10), bemerkenswert ist aber die deutlich geringere Temperaturstreuung. 1997 war diese 8 K abends bzw. 4 K morgens, dagegen ergeben sich 1998 Werte von 4 K abends bzw. 2 K morgens. Dies deutet auf eine bessere, einheitliche Abdichtung hin. Insbesondere S8 hat sich deutlich verbessert.

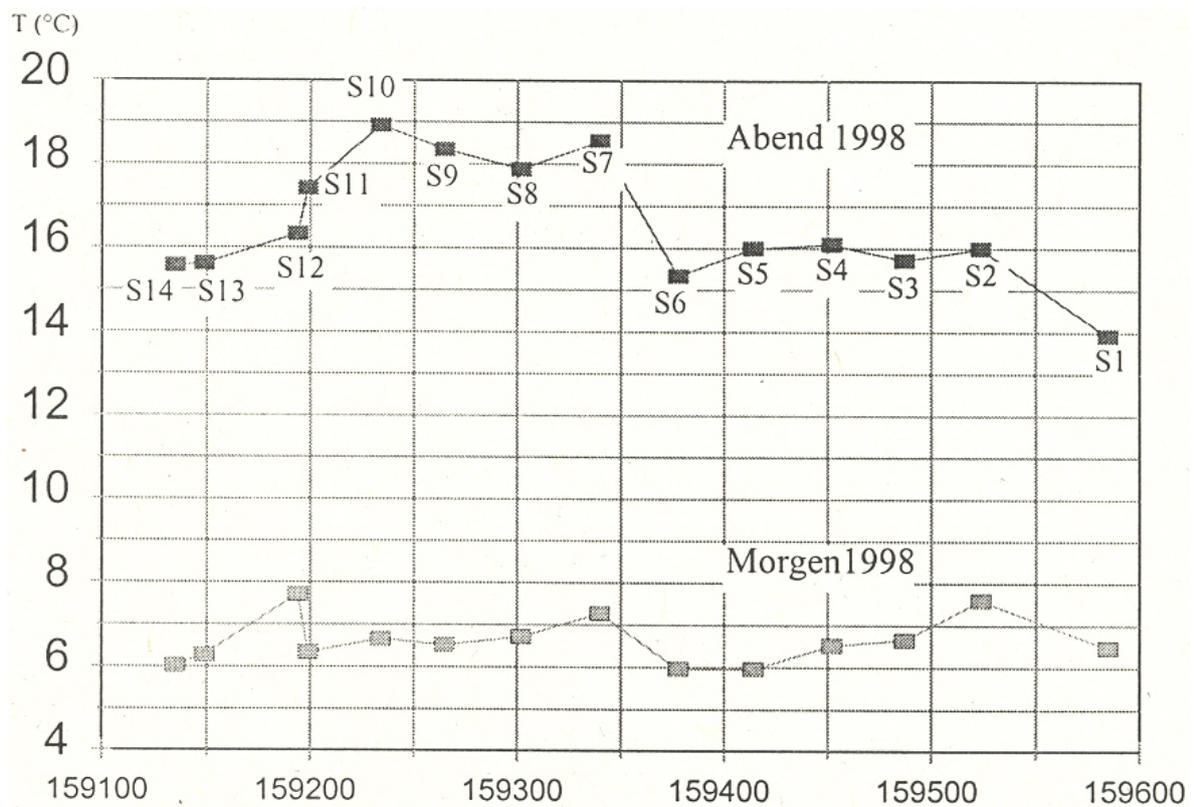
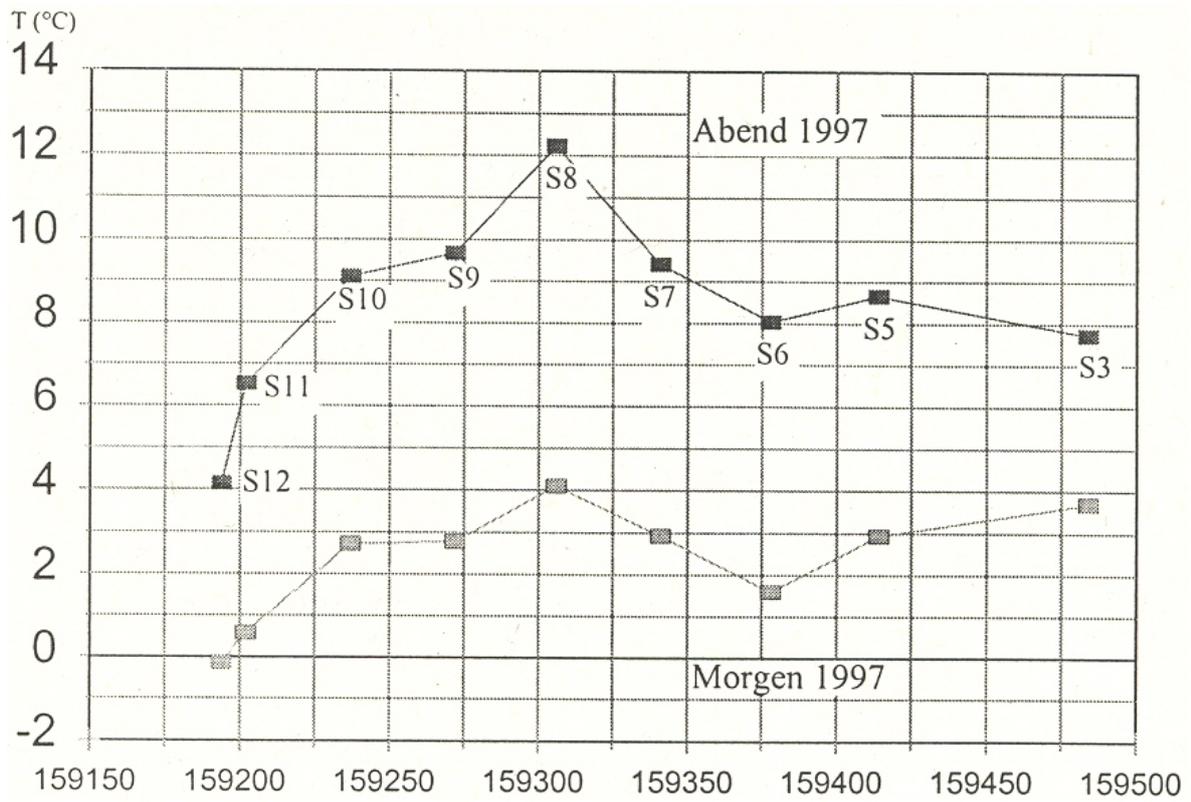


Abb. 1 : Temperaturverteilung an den Drainageschächten im Vergleich 1997/1998

## 6 Vergleich mit 1997, Maßnahmen und Erfolgskontrolle

Interessant ist der Vergleich mit den Ergebnissen von 1997. Die sichtbaren Unterschiede müssen auf dem Hintergrund der eingeleiteten Maßnahmen zur Behandlung der festgestellten Defizite (Ausgasungen, Wasseraustritte) sowie des regulären Deponiebetriebes, der zu einer fortlaufenden Umgestaltung der Deponiefläche führt, gesehen werden.

Zur Darstellung der Veränderungen sind folgende Karten erstellt worden

- Temperaturdifferenzkarte Abend 1998-1997
- Temperaturdifferenzkarte Morgen 1998-1997
- Karte der Veränderungen der extremen Wärmebereiche 1997/98
- Karte der Veränderungen der extremen Kältebereiche 1997/98

Im Folgenden werden die auffälligsten Phänomene auf den beiden letztgenannten Karten diskutiert. Zum Vergleich und zur Betrachtung des jeweiligen Umfeldes ist auch der Gesamteindruck auf den Temperaturdifferenzkarten Abend 1998-1997 bzw. Morgen 1998-1997 wichtig.

Karte der Veränderungen der extremen Wärmebereiche 1997/98 (Anlage 7)

### 1998 wärmer als 1997

- Bereich der Wärmeanomalien 9 und 18: hier ist Grünkompost bzw. Frischmüll neu gelagert worden
- Bereich der Wärmeanomalie 10: die Kippfront war 1997 weiter westlich und nicht so warm; auf der Temperaturdifferenzkarte Morgen 1998-1997 ist hier im südlichen Bereich parallel eine blaue bzw. weiß/rote Struktur zu sehen
- Bereich der Wärmeanomalien 6 und 7: der warme Randbereich (Saum) tritt deutlich hervor

### 1998 kälter als 1997

- Bereich im Südteil der Deponie: hier war 1997 eine deutliche Wärmeanomalie (mit Ausgasungen) zu sehen, auf einer ansonsten im Luftbild 1997 wenig differenzierten Fläche
- Bereich zwischen den Wärmeanomalien 10 und 13 (Mittelteil der Deponie): hier war 1997 Kompost gelagert, ebenso etwas südöstlich davon
- Bereich unmittelbar westlich der Wärmeanomalie 14: hier hat offensichtlich eine Verschiebung des Ausgasungsbereiches stattgefunden.
- Bereich oberhalb der Kälteanomalie 22 (nordwestlicher Deponierand): hier war vermutlich 1997 eine Ausgasung.
- SO-Hang: blaue Flecken waren vermutlich 1997 Ausgasungsstellen

## Karte der Veränderungen der extremen Kältebereiche 1997/98 (Anlage 8)

### 1998 wärmer als 1997

- Hier sind vor allem Wege bzw. Nutzungsänderungen zu sehen.

### 1998 kälter als 1997

- Bereich der Kälteanomalie 23: Bodenveränderung für die geplante Sickerwasseraufbereitungsanlage
- Bereich der Kälteanomalie 22: stärkere Durchfeuchtung im Vergleich zu 1997
- Bereich der Kälteanomalie 11: Mulde stärker ausgeprägt, daher verstärkte Kaltluftsammlung
- Bereich der Kälteanomalie 5: Nutzungsänderung oder Zunahme der Feuchte
- Bereich der Kälteanomalie 16: verstärkter Wasseraustritt
- SW Ecke der Deponie: blauer Bereich vermutlich auf stärkere Verdunstung (1998) zurückzuführen

## **7 Fazit**

Beschränkt man sich nur auf das Problem der Ausgasungen so gibt es nach Abschluss dieser Studie drei unterschiedliche Methoden (die Vor- und Nachteile sind in der Tab.6 zusammengefasst):

- klassische FID-Messung
- Luftbildflug im nahen Infrarot (CIR-Falschfarbenaufnahme)
- Thermalscannerbefliegung

Tab. 6 - Vergleich der Meßmethoden für Ausgasungen

	FID	CIR	Thermalscanner
Methode	Vor-Ort-Gasmessung	Vegetationsanomalien im nahen Infrarot	Thermalverhalten aus Abend- und Morgenbefliegung
Aufnahme	ganzjährig bei geeigneter Wetterlage	Tagaufnahme im Sommer (wolkenfrei)	Winter/Frühjahr; Abend- und Morgenaufnahme bei windschwacher Strahlungswetterlage (trockener Boden)
Vorteil	quantitativer Nachweis	flächendeckende qualitative Aussage	flächendeckende qualitative Aussage; Detektion von weiteren, für die Beurteilung des Deponieverhaltens und für die Betriebsgestaltung wichtigen Phänomenen als "Abfallprodukt"; Kombination mit Luftbildflug
Nachteil	Abstand der Raster-	keine Aussage an	Problem bei dichter Vegetation
	Messpunkte, wichtige	Stellen mit wenig	(Bäume, Sträucher), Bodensicht
	Stellen können ausge-	Strauch bewuchs;	erforderlich
	lassen werden;	schwierige	
	Probleme		
	bei dichter Vegetation	Interpretation	
	(Sträucher) und un-		
	zugänglichen Stellen		
Anwendungsfall	gut begehbare, relativ	Deponie mit stark	Inhomogene Deponie mit
	homogene Deponie	bewachsenen	mäßigem Bewuchs
	ohne		
	dichten Bewuchs	Randbereichen	

Es zeigt sich, dass alle drei Methoden nur einen jeweils unterschiedlichen Teil des Problems abdecken. Welche Methode am geeignetsten ist, hängt von den speziellen Gegebenheiten der Deponie und den zeitlichen Anforderungen ab. Eventuell führt auch erst eine Kombination verschiedener Methoden zum Erfolg.

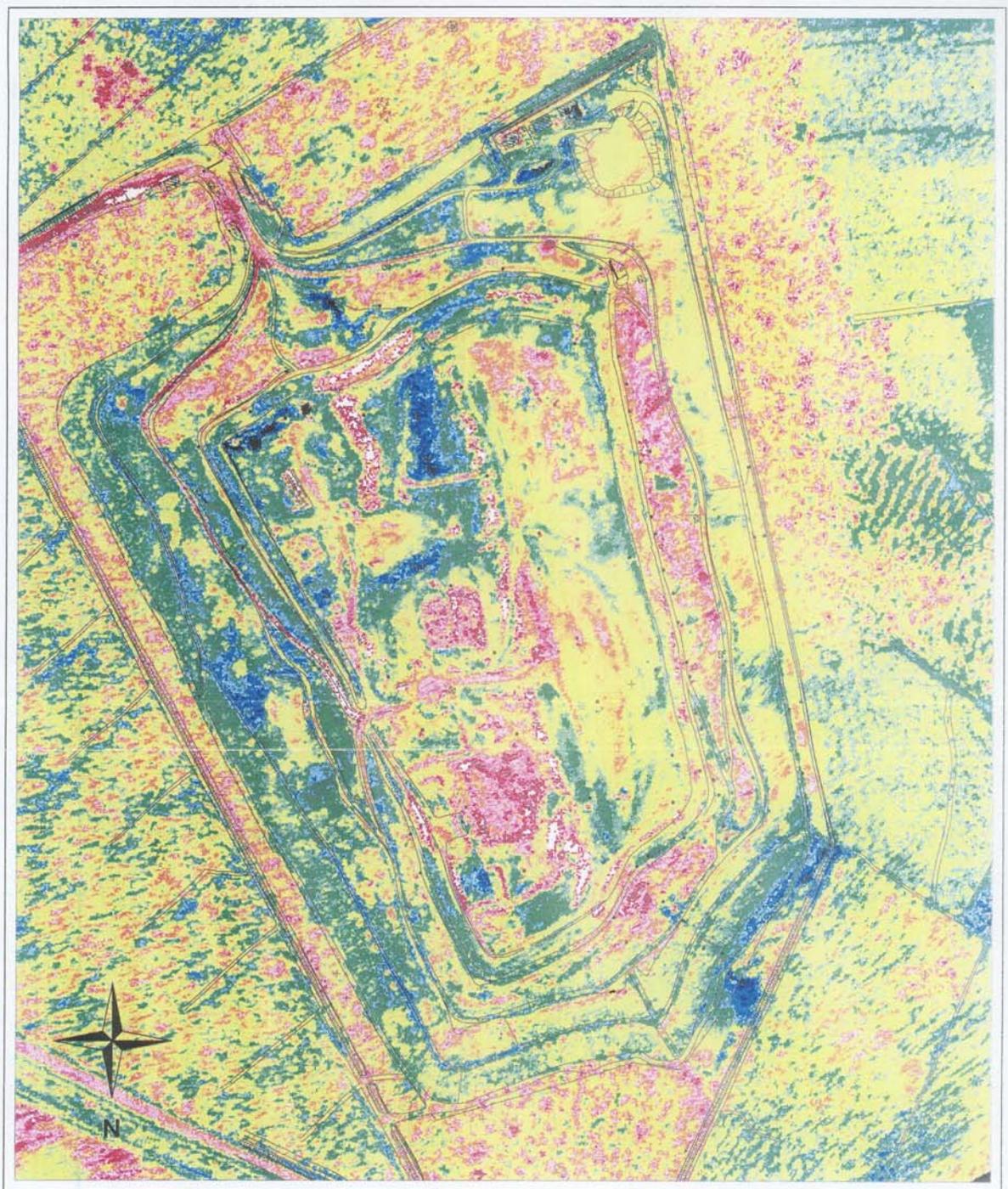
Die hier vorgeschlagene Kombination von Thermalscannermethode und anschließender FID-Messung bietet gegenüber allen anderen Methoden folgende große Vorteile:

- flächendeckende Vorab-Erkundung zur gezielten Steuerung der FID-Messungen

- Alle wesentlichen Bereiche werden erfasst
- Bedeutender Umfang an flächendeckenden Zusatzinformationen (Feuchtigkeit, Kaltluftabfluss, thermische Reaktionen, Kontrolle des Gas- und Drainagesystems, Hinweise auf Ursprungsort und Ausbreitungsverhalten von Geruchsemissionen, Lokalisierung von inneren Brandherden)
- Aufwand und Kosten sind gemessen an der erhaltenen Information relativ niedrig.

Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Vorteil ist eine beträchtliche Schärfung des Blicks für das Deponieverhalten. Zusammenhänge werden transparenter. Eine Fülle von Anregungen für eine Optimierung des Deponiebetriebes kann gewonnen werden.

Als Gesamtergebnis kann hiermit zusammengefasst werden, dass die Fernerkundung mit dem Thermalscanner wesentlich zur Reduzierung des Aufwands von FID-Messungen beitragen kann. Darüber hinaus wird eine Fülle von Informationen erzeugt, die der Betreiber einer Deponie benötigt, um den Anforderungen und den Berichtspflichten nach TA Abfall und TA Siedlungsabfall nachkommen zu können.



Deponie Eichelbuck  
Thermalkarte Abend 1998

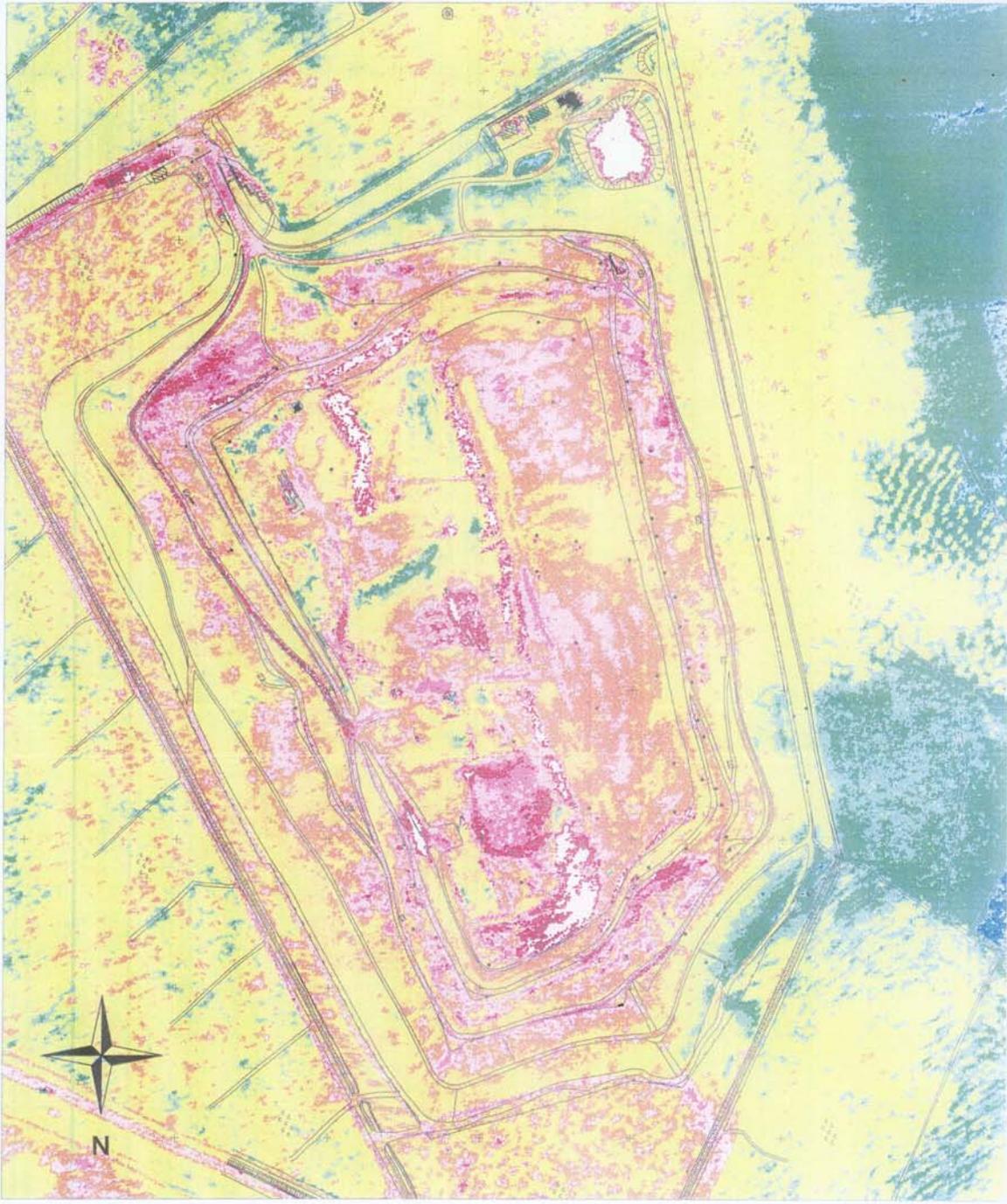
0 50 100 Meter

Anlage 1



Steinicke und Streifeneder





Deponie Eichelbuck  
Thermalkarte Morgen 1998

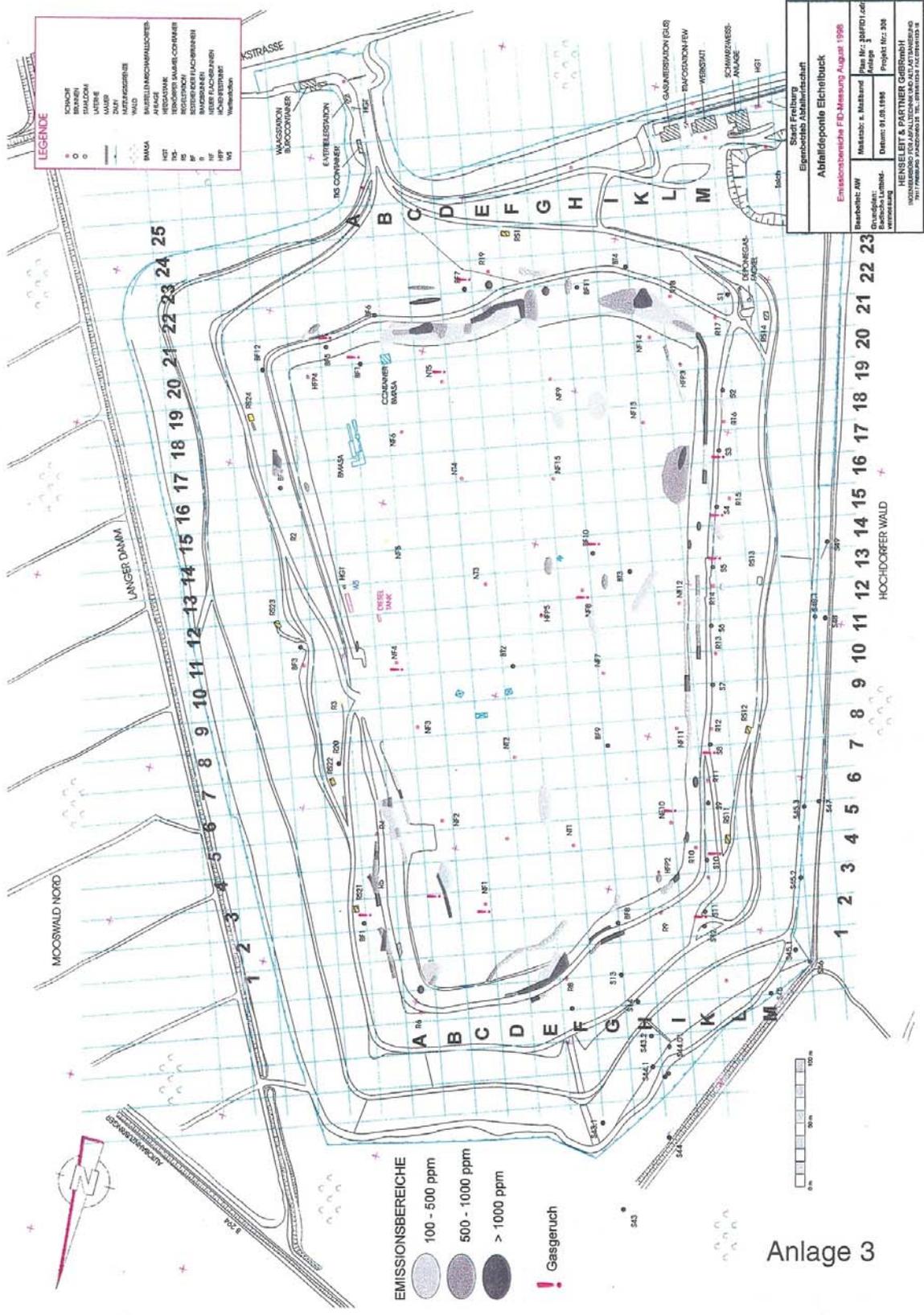
0 50 100 Meter

Anlana 2



Steinicke und Streifeneder



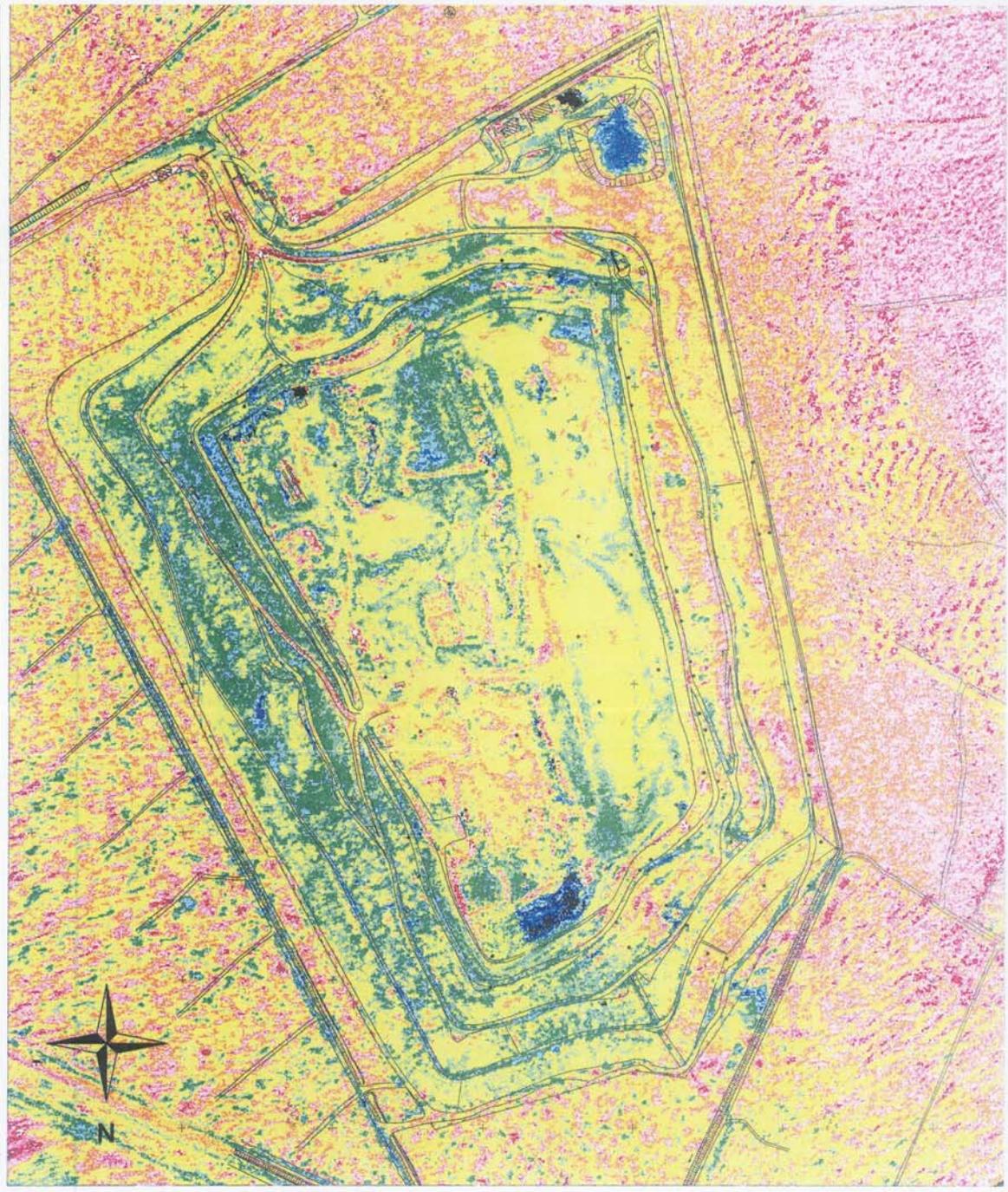


**LEGENDE**

○	BÜNDCHEN
○	STRAßEN
○	LAUBHE
○	WALD
○	WEGWEISER
○	BWAASA
○	KANTEN
○	REINIGUNG
○	WASSERFLÄCHEN
○	GEBÄUDE
○	WEGWEISER

Stadt Freiburg Eigenbetrieb Abfallwirtschaft	
<b>Anfalldeponie Eichelbuck</b>	
Emissionsbereichliche FB-Messung August 1998	
Bearbeitet: AW	Messzeit: s. Tabelle
Gezeichnet: Buchholz/Lübner	Plan Nr.: 3/98/1/1.cad
Verarbeitet: H. H. H.	Datum: 01.08.1998
Projekt Nr.: 300	
HENSELEIT & PARTNER GBR/BMBH 10771 FREIBURG, FRIEDRICH-STR. 107, 78192 FREIBURG, S.	

Anlage 3



Deponie Eichelbuck  
Temperaturdifferenzkarte Abend - Morgen 1998

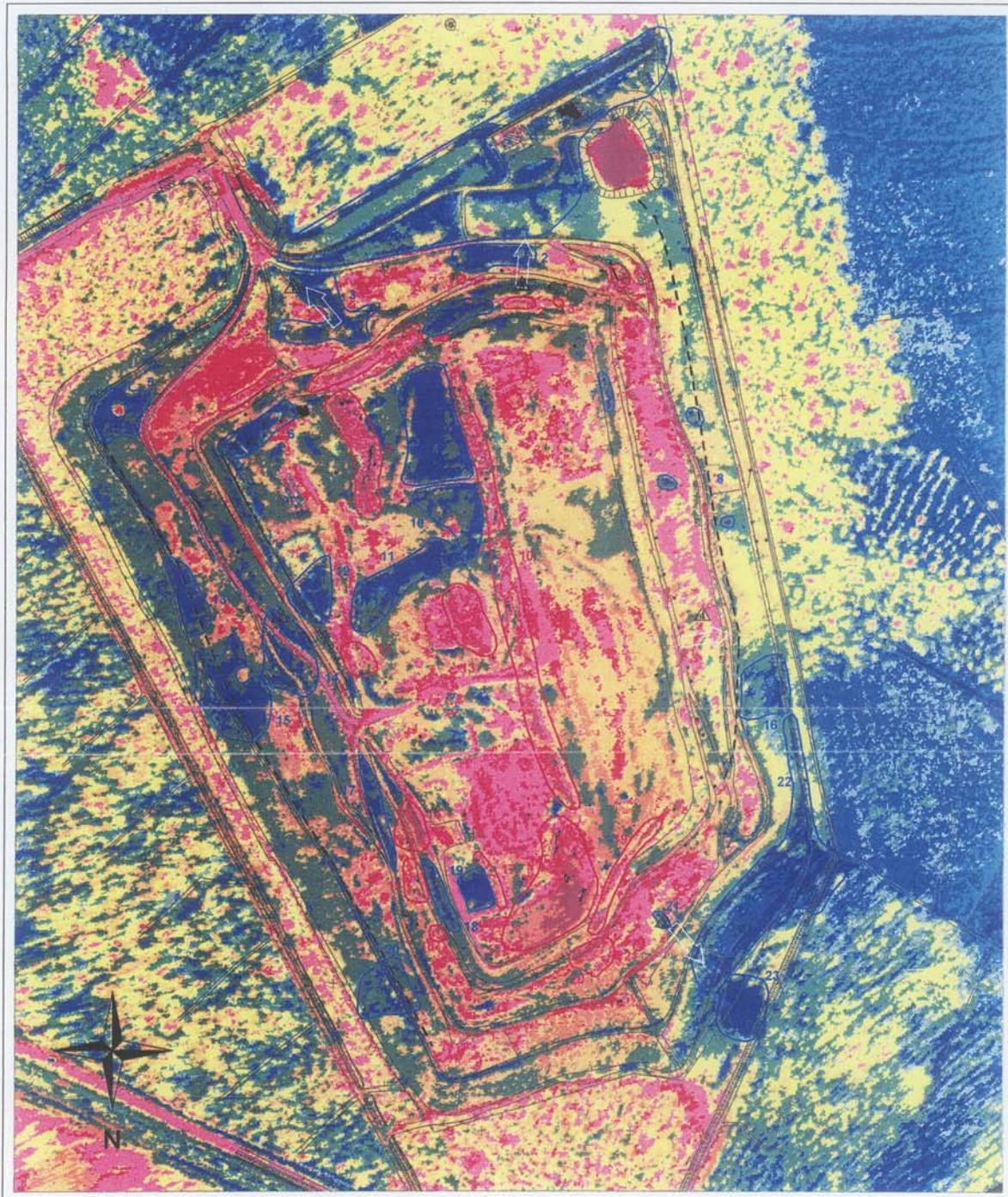
0 50 100 Meter

Anlage 4



Steinicke und Streifeneder





## Deponie Eichelbuck Klassifizierte Thermalkarte 1998

0 50 100 Meter

Anlage 5

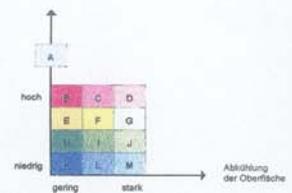


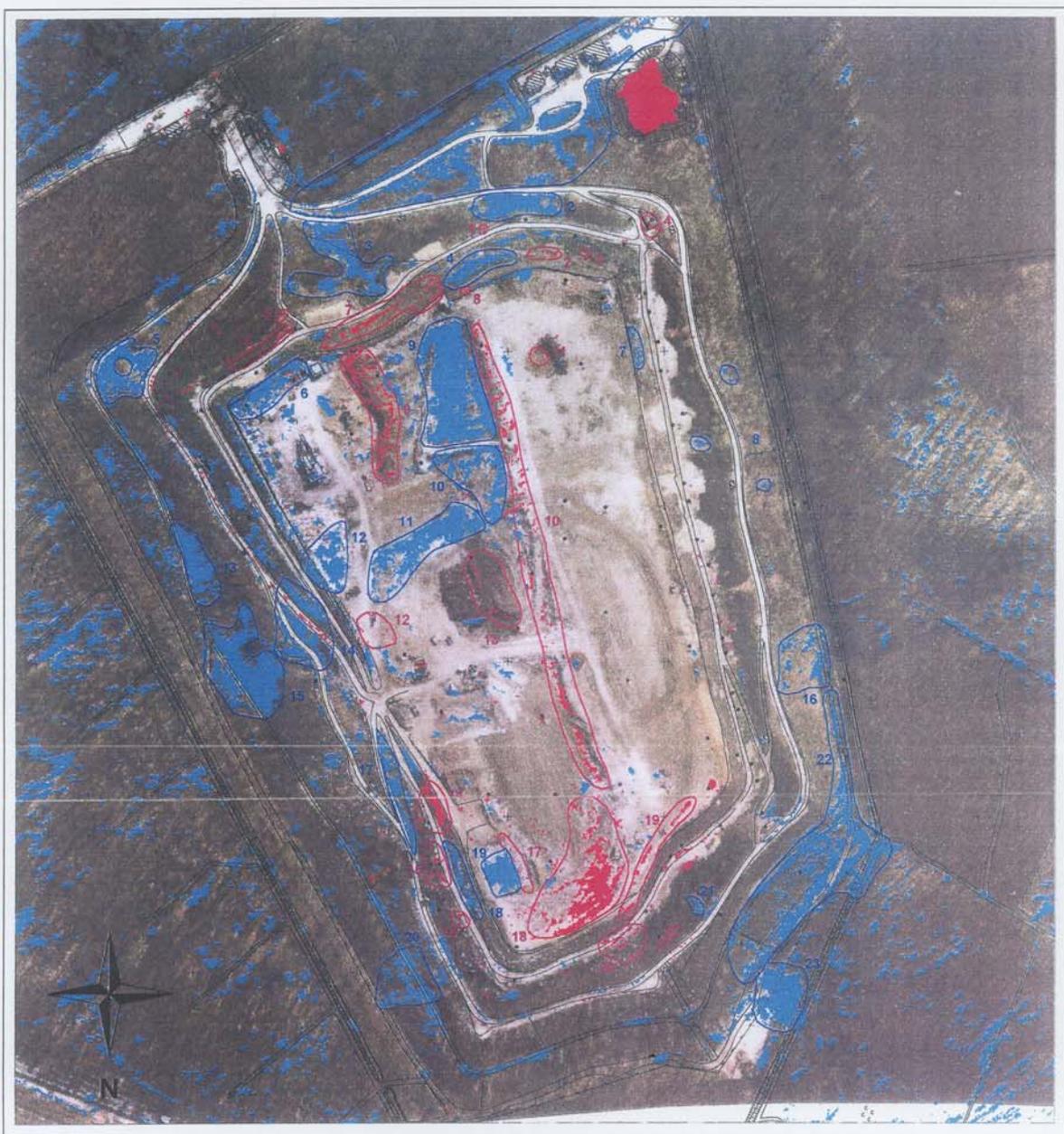
Steinicke und Streifeneder

- Wärmeanomalie (Ausgasungen, exotherme Prozesse)
- Kälteanomalie (Feuchte, Sickerwasseraustritt)
- ⇨ Kaltluftabfluß
- △ Bodenmeßpunkt
- Sammelleitung Ost/West

### Klassifikation des Oberflächentemperaturverhaltens

mittlere Ober-  
flächentemperatur





Deponie Eichelbuck  
Karte der Wärme- und Kälteanomalien 1998

0 50 100 Meter

Anlage 6



Steinicke und Streifeneder

- Wärmeanomalie** (Ausgasungen, exotherme Prozesse)
- Kälteanomalie** (Feuchte, Sickerwasseraustritt)

Die eingetragenen Wärme- und Kälteanomalien sind durchnummeriert und werden im Text erläutert.



Deponie Eichelbuck  
Karte der Veränderungen der extremen Wärmebereiche 1997/98

0 50 100 Meter



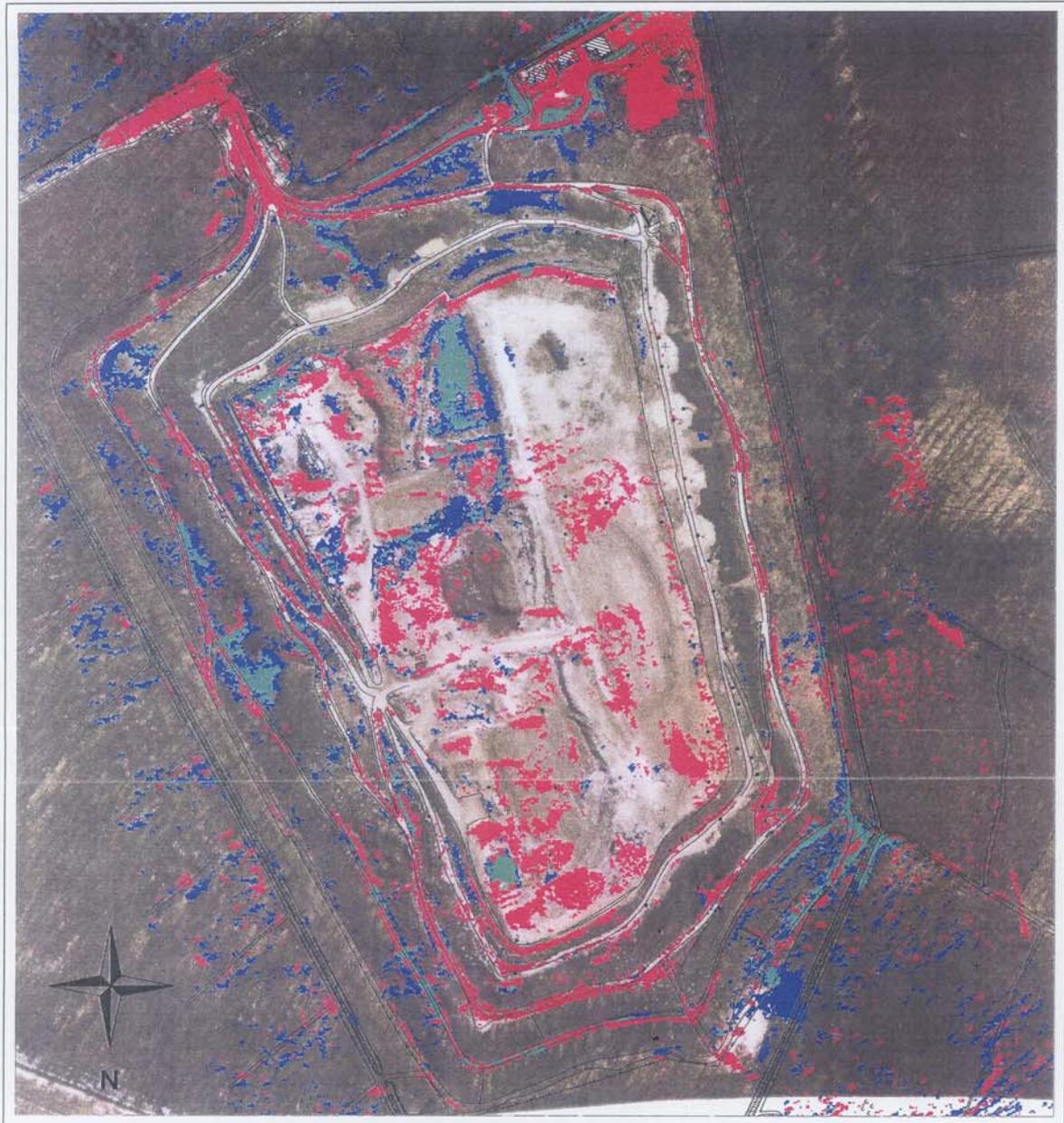
Anlage 7

Wärmebereiche

- in beiden Jahren gleich warm
- 1998 kälter als 1997
- 1998 wärmer als 1997



Steinicke und Streifeneder



Deponie Eichelbuck  
Karte der Veränderungen der extremen Kältebereiche 1997/98

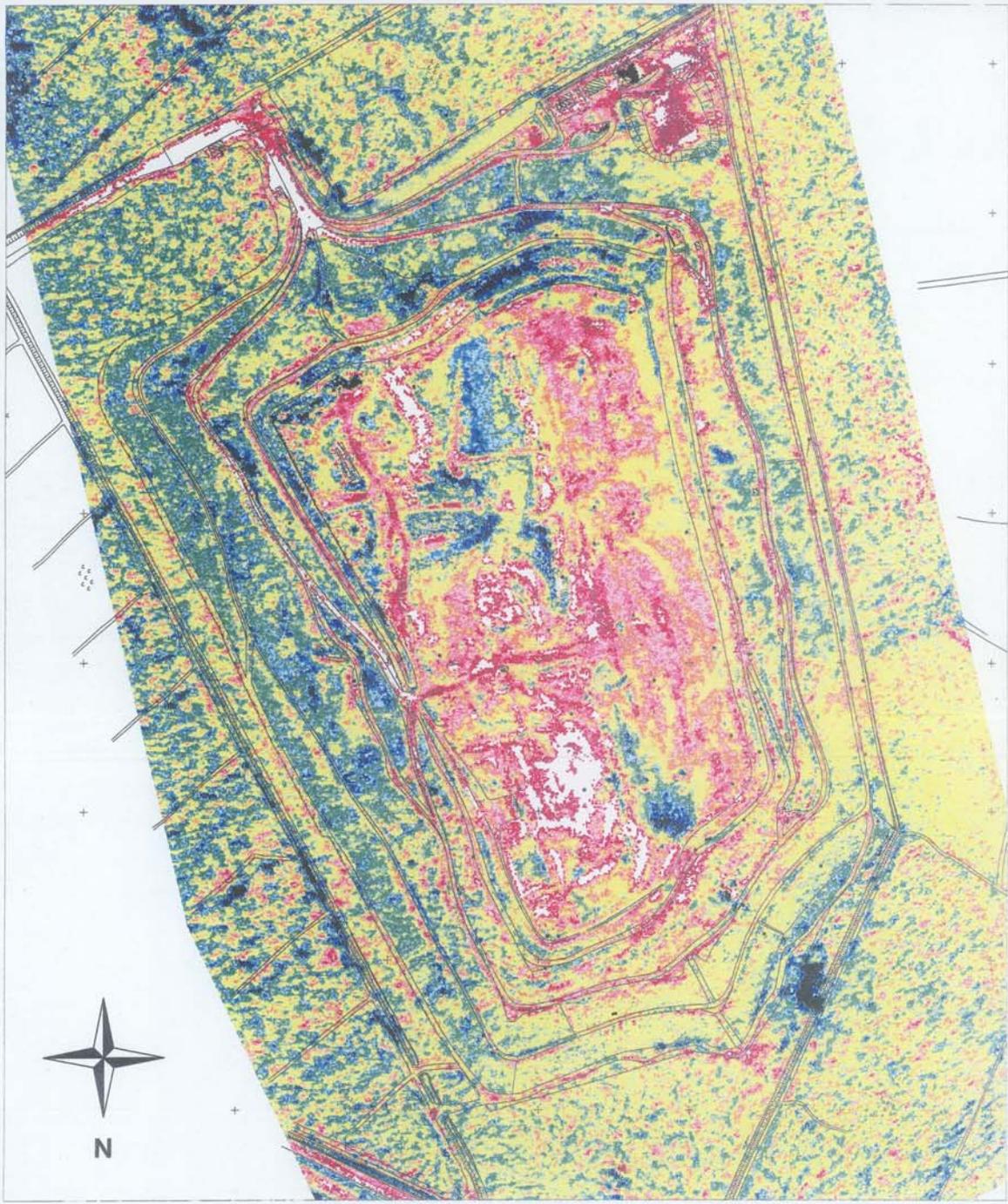
0 50 100 Meter

Anlage 8

SPACETEC  
Steinicke und Streifeneder

Kältebereiche

- in beiden Jahren gleich kalt
- 1998 kälter als 1997
- 1998 wärmer als 1997



Deponie Eichelbuck  
Temperaturdifferenzkarte Abend 1998 - 1997

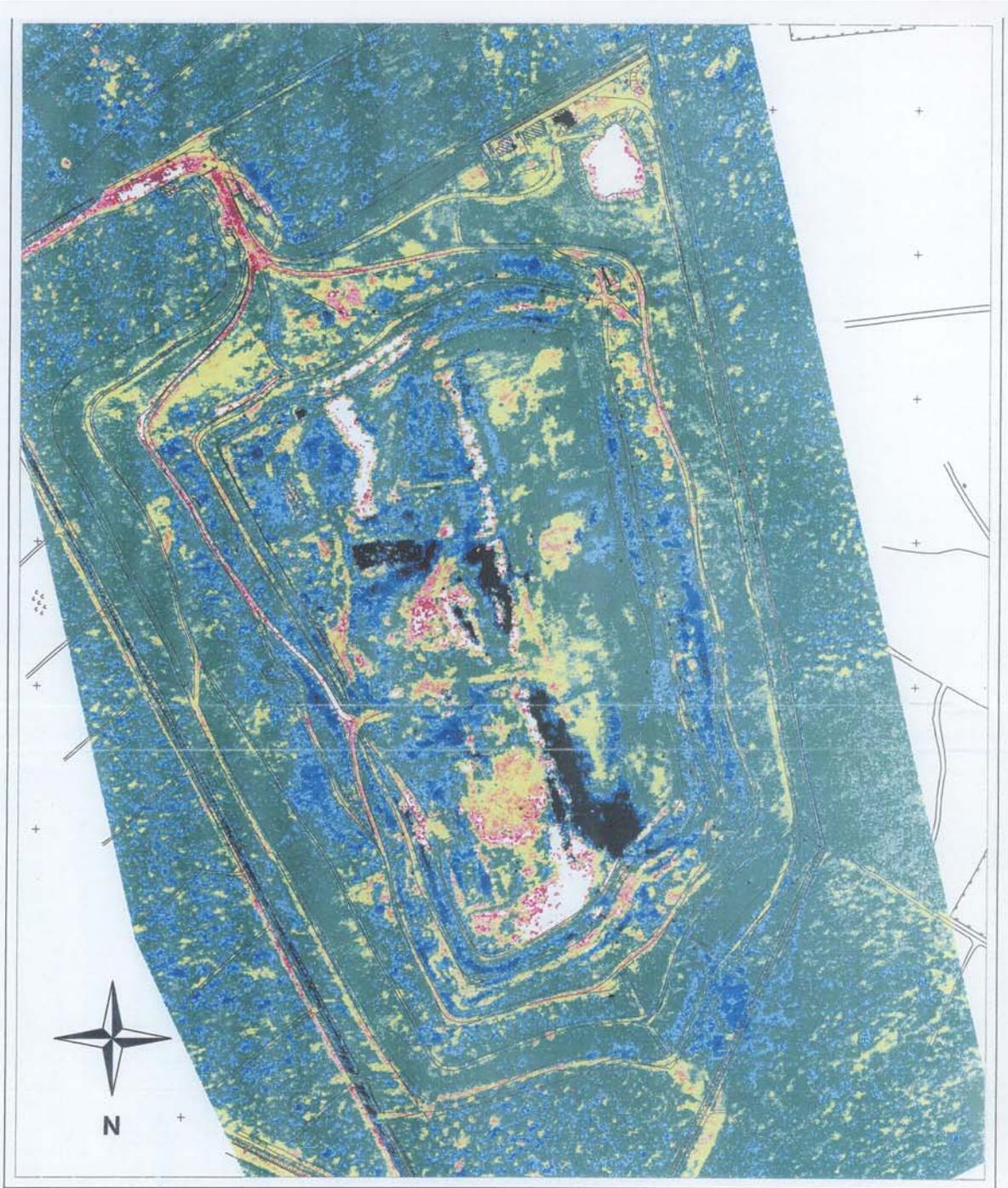
0 50 100 Meter

Anlage 9



Steinicke und Streifeneder





Deponie Eichelbuck  
Temperaturdifferenzkarte Morgen 1998 - 1997

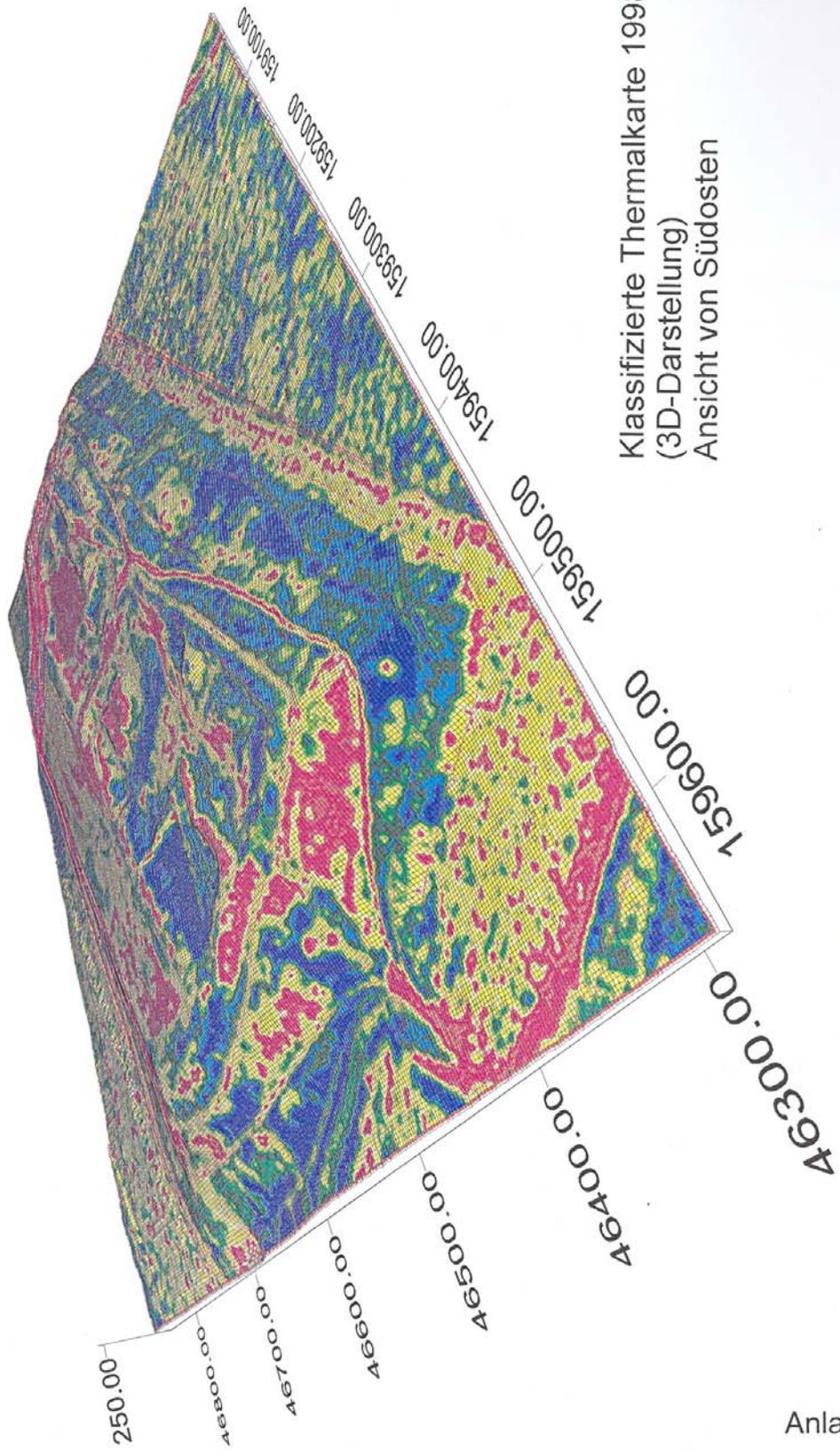
0 50 100 Meter

Anlage 10



Steinicke und Streifeneder





Klassifizierte Thermalkarte 1998  
(3D-Darstellung)  
Ansicht von Südosten

