

Detektion von Schwermetallkontaminationen in den Elb- und Muldeauen mittels Parametrisierung des spektralen Verhaltens der Vegetation

DISSERTATION

Zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Institut für Geowissenschaften

von Christian Götze
geboren am 05.01.1980 in Magdeburg

Gutachter:

1. Prof. Dr. Cornelia Gläßer
2. Prof. Dr. Gunter Menz

Betreuer:

Prof. Dr. Cornelia Gläßer
Dr. Ing. András Jung

Halle (Saale), Juni 2010

Die Verteidigung der Dissertation erfolgte am 16.12.2010.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
Formelverzeichnis	8
Verzeichnis der Anhänge	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1. Einleitung	14
1.1 MOTIVATION	14
1.2 ZIELSTELLUNG	15
1.3 STAND DER WISSENSCHAFT	16
1.3.1 STRESSPHYSIOLOGIE	16
1.3.2 SCHWERMETALLE IM BODEN	17
1.3.3 SCHWERMETALLE IN DER PFLANZE	19
1.3.4 SPEKTRALES VERHALTEN VON PFLANZEN	22
1.3.5 SPEKTRALES VERHALTEN VON PFLANZEN UNTER SCHWERMETALL-STRESS	26
1.3.6 METHODEN DER FERNERKUNDUNG ZUR STRESSDETEKTION	28
2 Untersuchungsgebiet	35
2.1 AUSWAHL DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS	35
2.2 GEOGRAPHISCHE EINORDNUNG	37
2.2 KLIMA	38
2.3 GEOLOGIE	38
2.4 HYDROLOGIE	39
2.5 GELÄNDEMORPHOLOGIE UND BÖDEN	39
2.6 VEGETATION UND NUTZUNG	40
2.7 BELASTUNGSSITUATION DER FLUSSAUE	41
3. Methoden und Daten	42
3.1 GEFÄßVERSUCH	42
3.2 ANALYTISCHE UNTERSUCHUNGEN	44
3.2.1 SCHWERMETALLE UND NÄHRSTOFFE	44
3.2.2 PIGMENTE	45
3.2.3 WASSERGEHALT	46
3.3 SPEKTROMETRISCHE FELD- UND LABORMESSUNGEN	46
3.4 FERNERKUNDUNGSDATEN	47
3.4.1 HYMAP - KAMPAGNE 2008 UND 2009	48
3.4.2 AISA	50
3.5 ZUSATZDATEN	52
4 Algorithmusentwicklung	54
4.1 VORVERARBEITUNG DER SPEKTRALDATEN	54
4.2 BESTIMMUNG VON LOKALEN EXTREMA UND SELEKTION DER SPEKTRALBEREICHE	56

4.3 AUSWAHL DER METHODEN	57
4.4 ENTWICKLUNG NEUER METHODEN	59
4.5 NORMALISATION	60
4.6 DESKRIPTIVE STATISTIKAUSWERTUNG DER ANALYSEDATEN UND METHODENWERTE	60
4.7 SENSITIVITÄTSANALYSE DER METHODEN	61
4.8 KORRELATIONSANALYSE	62
4.9 PROPORCIONALITÄTSFAKTOR	62
4.10 ÜBERTRAGUNG AUF FERNERKUNDUNGSDATEN	64
5 Ergebnisse und Diskussion	67
5.1 ANALYSEERGEBNISSE	67
5.1.1 GEFÄßVERSUCHSREIHEN	67
5.1.1.1 Schwermetall- und Nährstoffanalysen des Bodenmaterials	67
5.1.1.2 Schwermetallanalysen Pflanzen	69
5.1.1.3 Chlorophyllmessungen Pflanzen	72
5.1.1.4 Nährstoffanalysen Pflanzen	75
5.1.2 FELDVERSUCH	77
5.1.2.1 Schwermetallanalysen Pflanzen	77
5.1.2.2 Nährstoffanalysen und Inhaltsstoffe Pflanzen	80
5.1.2.3 Chlorophyllmessungen Pflanzen	81
5.2 SPEKTRALDATENERGEBNISSE	81
5.2.1 GEFÄßVERSUCH	82
5.2.2 FELDVERSUCH	83
5.2.3 AUFBAU EINER SPECTRAL LIBRARY UND SPEKTRALSIMULATION	84
5.3 SENSITIVITÄTSANALYSE	85
5.4 KORRELATIONSANALYSE	88
5.4.1 INTERKORRELATION ZWISCHEN DEN PARAMETERN	88
5.4.2 KORRELATION ZWISCHEN BODEN UND PFLANZE	88
5.4.3 KORRELATION ZWISCHEN ANALYSEWERTEN UND SPEKTRALWERTEN	89
5.4.3.1 Gefäßversuch	89
5.4.3.2 Feldversuch	93
5.5 PROPORCIONALITÄTSFAKTOR	95
5.6 ERGEBNISSE DER ÜBERTRAGUNG AUF FLÄCHENHAFTE DATEN	97
5.7 NUTZBARKEIT DES ENTWICKELTEN ALGORITHMUS	99
6 Schlussbetrachtung und Ausblick	102
6.1 ANALYSEERGEBNISSE	102
6.2 SPEKTRALDATENERGEBNISSE	103
6.3 ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG DES ALGORITHMUS UND STATISTIKAUSWERTUNG	104
6.4 FERNERKUNDUNGSDATEN	105
6.5 AUSBLICK	106
Anhang	118

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1.1: GESETZLICHE GRUNDLAGEN ZUR BEWERTUNG DER GEFÄHRDUNG DER AKTUELLEN SITUATION DER ELB- UND MULDEAUE	15
ABBILDUNG 1.2: STRESSFAKTOREN BEI PFLANZEN (BRUNOLD, ET AL., 1996).....	17
ABBILDUNG 1.3: DOSIS-WIRKUNGSBEZIEHUNG BEI ESSENTIELLEN UND NICHT-ESSENTIELLEN ELEMENTEN FÜR DIE PFLANZE (BRUNOLD, ET AL., 1996).....	19
ABBILDUNG 1.4: BIOCHEMISCHE UND MORPHOLOGISCHE PROZESSE IN DER PFLANZE BEI SCHWERMETALLÜBERSCHUSS.....	21
ABBILDUNG 1.5: TYPISCHER REFLEXIONSVERLAUF VON VEGETATION (NACH SWAIN & DAVIS 1978).....	23
ABBILDUNG 1.6: ABSORPTIONSKURVEN DER PFLANZENPIGMENTE (PURVES ET AL. 1998).	24
ABBILDUNG 2.1: BIOTYPEN- UND NUTZUNGSTYPENKARTIERUNG VON 2005 SACHSEN-ANHALT UND SACHSEN FÜR DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET AN DER MULDEAUE.....	36
ABBILDUNG 2.2: UNTERSUCHUNGSGEBIETE AN DER MITTLEREN ELBE (BREITENHAGEN, STECKBY UND WÖRLITZ).....	38
ABBILDUNG 2.3: SCHEMATISCHER QUERSCHNITT DURCH DIE AUE EINES FLUSSES (BREHM, ET AL., 1990).....	39
ABBILDUNG 2.4: GEOMORPHOLOGISCHE EINHEITEN DER AUENGEBIETE (PFEILE = PROBENAHME- UND MESSSTANDORTE FÜR DIE ARBEIT).	40
ABBILDUNG 3.1: FOTO VOM GEFÄßVERSUCH 2008 AM 14.05.08 (LINKS) UND FOTO VOM GEFÄßVERSUCH 2007 AM 11.08.08 (RECHTS).	43
ABBILDUNG 3.2: FOTO VON DER PLANETEN-KUGELMÜHLE (LINKS) UND FOTO VON DER ABFÜLLUNG DES GEMAHLENE PFLANZENMATERIALS (RECHTS).	44
ABBILDUNG 3.3: EXTRAHIERTE PIGMENTLÖSUNG AUS DEN UNTERSUCHTEN PFLANZEN (OBEN LINKS), SPEKTRALPHOTOMETER (OBEN RECHTS) UND CHLOROPHYLLGEHALTSMESSGERÄT SPAD-502 (WWW.ENVCOGLOBAL.COM) (UNTEN).....	45
ABBILDUNG 3.4: FELDSPEKTROMETRISCHE MESSUNGEN VOM 21.06.08 (LINKS) UND AUFBAU DER SPEKTROMETRISCHEN LABORMESSUNGEN (RECHTS).....	47
ABBILDUNG 3.5: AUSSCHNITT DER DATEN IN DER MULDEAUREGION DER HYEUROPE2008-KAMPAGNE VOM 28.07.08.	48
ABBILDUNG 3.6: EINORDNUNG DER HYMAP-DATENLAGE INS UNTERSUCHUNGSGEBIET.....	49
ABBILDUNG 3.7: AISA EAGLE HYPERSPEKTRALSSENSOR (LINKS) UND ULTRALEICHTFLUGZEUG (TRIKE) (LINKS).....	51
ABBILDUNG 3.8: EINORDNUNG DER AISA-DATENLAGE INS UNTERSUCHUNGSGEBIET.	52
ABBILDUNG 3.9: AUFNAHME DER „SCHLEUSENHEGER WIESEN“ BEI DESSAU MIT DEM HYPERSPEKTRALSSENSOR AISA-EAGLE VOM 03.07.2008 - ECHTFARB (LINKS) UND CIR (RECHTS).....	52
ABBILDUNG 3.10: BODENFORMENKARTE DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS „SCHLEUSENHEGER WIESEN“ BEI WÖRLITZ.....	53
ABBILDUNG 4.1: ARBEITSSCHRITTE ZUR ALGORITHMUSENTWICKLUNG ZUR SCHWERMETALLSTRESSDETEKTION BEI AUENVEGETATION UND ÜBERTRAGUNG AUF FERNERKUNDUNGSDATEN.	54
ABBILDUNG 4.2: <i>SPLICE CORRECTION</i> DER REFLEXIONSKURVE AM BEISPIEL EINER BRENNNESSELPLANZE.	55
ABBILDUNG 4.3: VARIATIONSKOEFFIZIENT ZWISCHEN PARALLELMESSUNGEN DER GEFÄßREIHE VON 2007.....	56
ABBILDUNG 4.4: ELIMINIERTE SPEKTRALBEREICHE MIT ZU HOHEM VARIATIONSKOEFFIZIENTEN AM BEISPIEL EINER BRENNNESSELPLANZE.....	56
ABBILDUNG 4.5: BESTIMMUNG DER LOKALEN EXTREMA DER GESAMTHEIT DER SPEKTREN VOM GEFÄßVERSUCH 2007 IM ZEITRAUM 2008.	57
ABBILDUNG 4.6: AUFBAU EINES BOXPLOTS (NACH KAMMERMEYER ET AL. 2000).....	61
ABBILDUNG 4.7: GRAFISCHE DARSTELLUNG VERSCHIEDENER PROPORTIONALITÄTSFAKTOREN (MODELLHAFT) ZWISCHEN DEN KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN SCHWERMETALLGEHALT UND MITTEL AUS CHLOROPHYLL- UND NÄHRSTOFFGEHALT.	64
ABBILDUNG 4.8: FUNKTIONSWEISE DER <i>BAND MATH</i> -FUNKTION (ENVI USER'S GUIDE).	65
ABBILDUNG 5.1: MESS- UND ERNTEZEITPUNKTE VON 2008 FÜR DIE GEFÄßREIHE 2007.....	67
ABBILDUNG 5.2: SCHWERMETALLGEHALTE [MG/KG] DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 (TYP A,B UND C) SOWIE DEREN GRENZWERTE DER BBODSCHV - TEIL 1.	68
ABBILDUNG 5.3: NÄHRSTOFF- UND SCHWERMETALLGEHALTE [MG/KG] DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 (TYP A,B UND C) SOWIE DEREN GRENZWERTE DER BBODSCHV - TEIL 2.	68
ABBILDUNG 5.4: BOXPLOT VON BLEI [MG/KG] (LINKS) UND CU [MG/KG] (RECHTS) DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.	70
ABBILDUNG 5.5: HISTOGRAMM FÜR AS [MG/KG] (LINKS) UND Pb [MG/KG] (RECHTS) DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2008 IM JAHR 2008 MIT NORMALVERTEILUNGSKURVE.	71

ABBILDUNG 5.6: SCHWERMETALLGEHALT CU [MG/KG] (LINKS) UND AS [MG/KG] (RECHTS) DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 (PROBENWERTE SORTIERT).....	72
ABBILDUNG 5.7: SCHWERMETALLGEHALT AS [MG/KG] (LINKS) UND NI [MG/KG] (RECHTS) DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2008 IM JAHR 2008 (PROBENWERTE SORTIERT).....	72
ABBILDUNG 5.8: BEZIEHUNG ZWISCHEN LABORPHOTOSPEKTROMETRISCH GEMESSENER CHLOROPHYLLKONZENTRATION [µG/MG] UND DEM IM FELD GEMESSENEN RELATIVEN CHLOROPHYLLGEHALT (MINOLTA SPAD-502) VON BRENNNESSELPFLANZEN AUS DEM GEFÄßVERSUCH IM JAHR 2007.	73
ABBILDUNG 5.9: RELATIVER CHLOROPHYLLGEHALT (SPAD-WERT) IN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 (UND TABELLARISCHE MITTELWERTE).	74
ABBILDUNG 5.10: BOXPLOT FÜR DEN RELATIVEN CHLOROPHYLLGEHALT (SPAD-WERT) DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 (LINKS) UND HISTOGRAMM FÜR DEN RELATIVEN CHLOROPHYLLGEHALT (SPAD-WERT) DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 MIT NORMALVERTEILUNGSKURVE (RECHTS).....	74
ABBILDUNG 5.11: VERTEILUNG DES RELATIVEN CHLOROPHYLLGEHALTS DER PFLANZEN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.	75
ABBILDUNG 5.12: NÄHRSTOFFGEHALTE VON P (LINKS) UND K (RECHTS) [MG/KG] DER PFLANZEN ZWISCHEN DEN BODENTYPEN DER GEFÄßREIHE 2007 IM JAHR 2008 (ABSTEIGEND SORTIERT).	76
ABBILDUNG 5.13: NÄHRSTOFFGEHALTE VON P [MG/KG] DER PFLANZEN ZWISCHEN DEN BODENTYPEN DER GEFÄßREIHE 2008 IM JAHR 2008 (ABSTEIGEND SORTIERT).....	76
ABBILDUNG 5.14: BOXPLOT FÜR DEN NÄHRSTOFFGEHALT P (LINKS) UND K (RECHTS) DER PFLANZEN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.	77
ABBILDUNG 5.15: SPEKTROMETER- UND ANALYSENPUNKTE FÜR DIE KAMPAGNEN HYMAP 2008 UND 2009 IM UNTERSUCHUNGSGBIET D MULDEAUE.	78
ABBILDUNG 5.16: LAGEFAKTOR (FL) FÜR DIE MESSPUNKTE VON 2008 UND 2009 VERGlichen MIT IHREN ZUGEHÖRIGEN SCHWERMETALLGEHALTEN [MG/KG].	79
ABBILDUNG 5.17: BOXPLOT DES SCHWERMETALLGEHALTS VON ZN (LINKS) UND Cd (RECHTS) DER HYMAP-KAMPAGNE 2009... 80	80
ABBILDUNG 5.18: LIGNIN- [%] (LINKS) UND WASSERGEHALT [%] (RECHTS) DER PFLANZEN DER HYMAP-KAMPAGNE 2009. BR = BRENNNESSEL, RGG = ROHRGLANZGRAS, WFS = WIESENFUCHSSCHWANZ.	81
ABBILDUNG 5.19: GESAMTVARIATION (LINKS) UND VARIATION DES BEIFUßES (RECHTS) DER GEMITTELTEN SPEKTREN VOM GEFÄßVERSUCH 2007 JAHR 2008.....	82
ABBILDUNG 5.20: VERGLEICH DER SPEKTRALDATEN VON BEIFUß (2) (OBEN) UND BRENNNESSEL (3) (UNTEN) AUF BODENTYP B (HOCHFLÄCHE) UND C (RINNE) DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.....	83
ABBILDUNG 5.21: AUSWAHL VON SPEKTRALDATEN DER HYMAP-KAMPAGNE 2008.	84
ABBILDUNG 5.22: SPECTRAL LIBRARY FÜR BEIFUß DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2008.....	85
ABBILDUNG 5.23: SIMULATIONSSPEKTREN VON ROHRGLANZGRAS FÜR VERSCHIEDENE FERNERKUNDUNGSDATENSÄTZE.	85
ABBILDUNG 5.24: VARIATIONSKOEFFIZIENT Cv [%] DER METHODEN IN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM GESAMTEN MESSZEITRAUM 2008 UND ZWISCHEN DEN BODENTYPEN (A, B, C) IM MESSZEITRAUM 2008.....	86
ABBILDUNG 5.25: VARIATIONSKOEFFIZIENTEN DER UNTERSUCHTEN WASSERINDIZES DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.	87
ABBILDUNG 5.26: MITTLERE ZEITFENSTER FÜR SPEKTRALE MESSUNGEN ZUR PARAMETRISIERUNG VON STRESSOREN IN AUENGBIETEN FÜR DEN ZEITRAUM 2007-2009.	87
ABBILDUNG 5.27: BEZIEHUNG ZWISCHEN DEM SCHWERMETALLGEHALT AS [MG/KG] DES BODENS UND DER PFLANZE DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.	88
ABBILDUNG 5.28: STREUMATRIX ZWISCHEN DEM GGFN UND DEM RELATIVEN CHLOROPHYLLGEHALT (SPAD) DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 BEI DEN 5 UNTERSUCHTEN PFLANZENARTEN (LINKS) UND DEM NDLI UND DEM RELATIVEN CHLOROPHYLLGEHALT (SPAD) UND STREUMATRIX ZWISCHEN DEM DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 BEI BRENNNESSELPFLANZEN (RECHTS).....	91
ABBILDUNG 5.29: STREUMATRIX ZWISCHEN DEM DSWI5 UND DEM SCHWERMETALLGEHALT AS [MG/KG] DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 BEI ROHRGLANZGRASPFLANZEN (LINKS) UND STREUMATRIX ZWISCHEN DER BANDENTIEFE DER CR1725 UND DEM SCHWERMETALLGEHALT Cr [MG/KG] DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 BEI ROHRGLANZGRASPFLANZEN (RECHTS).	93
ABBILDUNG 5.30: SCATTERMATRIX ZWISCHEN DER BANDENTIEFE CR1725 UND DEM SCHWERMETALLGEHALT Pb, AS UND Cr (VON LINKS NACH RECHTS) DER MESSPUNKTE DER HYMAP-KAMPAGNE 2009 DER ROHRGLANZGRASPFLANZE.....	94
ABBILDUNG 5.31: BANDE IM SPEKTRALBEREICH VON 1710 BIS 1745 NM BEI FELDSPEKTREN (LINKS) UND SPEKTREN VON HYMAP 2003 (RECHTS) NACH DER CR1725-METHODE FÜR AUENPFLANZEN.	98
ABBILDUNG 5.32: GRAUSTUFENBILD (LINKS), SCHWELLENWERTSTUFENBILD (MITTE) UND SCHWELLENWERTSTUFENBILD MIT MASKE FÜR DEN AUENBEREICH (RECHTS) NACH DER ANWENDUNG DER CR1725-METHODE DES HYMAP-DATENSATZES VON 2008.	99

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1.1:	PH-WERTE FÜR DIE BEGINNENDE MOBILISIERUNG VERSCHIEDENER METALLE IN BÖDEN (AUS BLUME, 2004).....	18
TABELLE 1.2:	ERTRAGSBEOZUGENE BEREICHE DER PFLANZENTOXIZITÄT FÜR EINIGE SCHWERMETALLE (NACH SAUERBECK, 1982)..	20
TABELLE 1.3:	PFLANZENPIGMENTE UND IHR ABSORPTIONSMAXIMA (NACH KUMAR ET AL. 2001).	23
TABELLE 1.4:	METHODENÜBERSICHT AUS DER LITERATUR MIT ZUGEHÖRIGER REFERENZ UND BESTIMMENDEM PARAMETER.	31
TABELLE 2.1:	KRITERIEN FÜR DIE AUSWAHL DER UNTERSUCHUNGSGBIETE.	35
TABELLE 2.2:	MITTLERE TEMPERATUR- UND NIEDERSCHLAGSDATEN VON 1961-1990 DER UNTERSUCHUNGSGBIETE (NACH: DWD, 1997-1999).	38
TABELLE 2.3:	HAUPTSÄCHLICHE ARTEN VON SCHADSTOFFQUELLEN IM MULDE- UND SAALESYSTEM (GELLER, ET AL., 2004).	41
TABELLE 3.1:	SCHWERMETALLBELASTUNG DER BÖDEN DER GEFÄßREIHE 2007 SOWIE DIE BODENFORM UND MORPHOLOGIE.	42
TABELLE 3.3:	AUSGEWÄHLTE PFLANZENARTEN FÜR DIE SPEKTROMETERMESSUNGEN.....	43
TABELLE 3.2:	SCHWERMETALLBELASTUNG DER BÖDEN DER GEFÄßREIHE 2008 UND DIE BUNDESBODENSCHUTZVERORDNUNGSGRENZWERTE DER JEWEILIGEN ELEMENTE.....	43
TABELLE 3.4:	FLUGINFORMATIONEN ZUM HYMAP-DATENSATZ IM BEREICH DER MULDEAUE.....	49
TABELLE 3.5:	EIGENSCHAFTEN DES AISA EAGLE.....	51
TABELLE 4.1:	METHODENÜBERSICHT DER FORSCHUNGSARBEIT.	58
TABELLE 4.2:	ÜBERSICHT DER VERWENDETEN DESKRIPTIVEN STATISTIK.	61
TABELLE 5.1:	DESKRIPTIVE STATISTIK DER GEFÄßREIHE 2007 IM JAHR 2008.....	69
TABELLE 5.2:	DESKRIPTIVE STATISTIK DER GEFÄßREIHE 2008 IM JAHR 2008.....	70
TABELLE 5.3:	GRENZWERTE DER FMVO.....	70
TABELLE 5.4:	KOLMOGOROV-SMIRNOV-TEST FÜR DIE GEFÄßREIHE 2007 IM JAHR 2008.	71
TABELLE 5.5:	NORMALVERTEILUNGSTEST FÜR DEN RELATIVEN CHLOROPHYLLGEHALT (SPAD-WERT) DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008	75
TABELLE 5.6:	NORMALVERTEILUNGSTEST FÜR DEN NÄHRSTOFFGEHALT P UND K DER PFLANZEN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.	77
TABELLE 5.7:	MESS- UND ANALYSEDATEN FÜR DIE HYMAP-KAMPAGNE 2009.	80
TABELLE 5.8:	INTERKORRELATIONEN (SPEARMAN KORRELATIONSKOEFFIZIENT) ZWISCHEN DEN UNTERSUCHTEN PARAMETERN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.	88
TABELLE 5.9:	KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN DER SPEKTRALMETHODEN UND DES RELATIVEN CHLOROPHYLLGEHALTS (SPAD).....	90
TABELLE 5.10:	KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN DER SPEKTRALMETHODEN UND DES GEMITTELTEN SCHWERMETALLGEHALTS (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn).	92
TABELLE 5.11:	MITTLERER ABSOLUTER KORRELATIONSKOEFFIZIENT DER SPEKTRALMETHODEN (AUSWAHL) UND DER SCHWERMETALLGEHALTE (Cr, Cu, Hg, Ni) DER MESSPUNKTE VON 2009 DER BRENNNESSEL UND DES ROHRGLANZGRAS. ...	95
TABELLE 5.12:	PROPORTIONALITÄTSFAKTOR FÜR SCHWERMETALL P_{SM} DER GEFÄßVERSUCHSREIHEN 2007 UND 2008 DER UNTERSUCHTEN 5 PFLANZENARTEN.....	96
TABELLE 5.13:	PROPORTIONALITÄTSFAKTOR FÜR CHLOROPHYLL P_{CHL} UND FÜR NÄHRSTOFFE P_{NS} DER GEFÄßVERSUCHSREIHEN 2007 UND 2008 DER UNTERSUCHTEN 5 PFLANZENARTEN.	97
TABELLE 5.14:	SCHWELLENWERTSTUFEN FÜR DIE BANDENTIEFE DER CR1725-METHODE (BEISPIEL As).....	98

FORMELVERZEICHNIS

FORMEL 1.1:	FORMEL ZUR BESTIMMUNG EINES SIMPLE RATIOS.....	28
FORMEL 1.2:	FORMEL ZUR BESTIMMUNG EINES NORMALIZED DIFFERENCE INDEX.	28
FORMEL 1.3:	FORMEL ZUR BESTIMMUNG DER RED-EDGE-POSITION MITTELS ERSTER ABLEITUNG DER SPEKTRALKURVE.	32
FORMEL 1.4:	FORMEL ZUR BESTIMMUNG DER RED-EDGE-POSITION MITTELS DES LINEAREN MODELS VON GUYOT & BARET. TEIL 1	32
FORMEL 1.5:	FORMEL ZUR BESTIMMUNG DER RED-EDGE-POSITION MITTELS DES LINEAREN MODELS VON GUYOT & BARET. TEIL 2	32
FORMEL 1.6:	<i>CONTINUUM-REMOVAL</i> -FUNKTION EINES REFLEXIONSSPEKTRUMS.	34
FORMEL 3.1:	FORMEL ZUR BERECHNUNG DER KONZENTRATION VON CHLOROPHYLL A + B [$\mu\text{G}/\text{MG}$].	46
FORMEL 4.1:	REFLEXIONSHÖHE BEI 1140 NM (GR1140).	59
FORMEL 4.2:	REFLEXIONSHÖHE BEI 1890 NM (GR1890).	59
FORMEL 4.3:	RATIO DER REFLEXIONSHÖHE ZWISCHEN 1080 NM UND 750 NM (GRATIO 1).....	59
FORMEL 4.4:	RATIO DER REFLEXIONSHÖHE ZWISCHEN 1130 NM UND 1170 NM (GRATIO 2).....	59
FORMEL 4.5:	TIEFE DER BANDE INNERHALB DES KONTINUUMBEREICHS ZWISCHEN 930 UND 1000 NM (CR970).....	59
FORMEL 4.6:	TIEFE DER BANDE INNERHALB DES KONTINUUMBEREICHS ZWISCHEN 1330 UND 1390 NM (CR1350).....	59
FORMEL 4.7:	TIEFE DER BANDE INNERHALB DES KONTINUUMBEREICHS ZWISCHEN 1690 UND 1740 NM (CR1725).....	59
FORMEL 4.8:	PROPORTIONALITÄTSFAKTOR FÜR SCHWERMETALLE.	63
FORMEL 4.9:	PROPORTIONALITÄTSFAKTOR FÜR CHLOROPHYLL.....	63
FORMEL 4.10:	PROPORTIONALITÄTSFAKTOR FÜR NÄHRSTOFFE.	63
FORMEL 4.11:	FORMEL ZUR BERECHNUNG DER TIEFE DER BANDE INNERHALB DES KONTINUUMBEREICHS (CLARK, ET AL., 1987).	65
FORMEL 4.12:	FORMEL ZUR BERECHNUNG EINES GLOBALEN SCHWELLENWERTVERFAHRENS (ENVI USER'S GUIDE).	66
FORMEL 5.1:	LAGEFAKTOR FÜR DIE MESSPUNKTE VON 2008 UND 2009.....	78

Verzeichnis der Anhänge

ABBILDUNG ANH. 1:	STRESSPHASEN (BRUNOLD, ET AL., 1996).	118
ABBILDUNG ANH. 2:	NATURA 2000-GEBIETE, NATIONALPARK HARZ, FIB UND NSG IN SACHSEN-ANHALT (LAU, 2008).	118
ABBILDUNG ANH. 3:	SCHEMA DER REGIONALEN BODENBILDUNGSBEREICHE (LAGB 2006).	119
ABBILDUNG ANH. 4:	FOTOS VON AUENGEBIETEN AN DER MULDE UNTER GRÜNLANDNUTZUNG (1 REIHE), WIESENFUCHSSCHWANZPFLANZEN (2 REIHE LINKS), BRENNNESSELPFLANZEN (2 REIHE RECHTS), ROHRGLANZGRASPFLANZEN (3 REIHE LINKS), BEIFUßPFLANZEN IM GEFÄßVERSUCH (3 REIHE RECHTS), KNICKFUCHSSCHWANZ (4 REIHE)	120
ABBILDUNG ANH. 5:	HOCHWASSER AN DER ELBE BEI DESSAU – AUFNAHMEN VOM 14. AUGUST 2000 (VORHER) UND 20. AUGUST 2002 (WÄHREND) MITTELS LANDSAT ETM+ (HTTP://VISIBLEEARTH.NASA.GOV/VIEW_DETAIL.PHP?ID=3584).....	121
ABBILDUNG ANH. 6:	HOCHWASSER AN DER MULDE BEI LÖBNITZ AUFNAHMEN VOM 14. AUGUST 2000 (VORHER) UND 20. AUGUST 2002 (WÄHREND) (HTTP://VISIBLEEARTH.NASA.GOV/VIEW_DETAIL.PHP?ID=3584).	121
ABBILDUNG ANH. 7:	GETESTETE FILTERMETHODEN IM BEREICH VON 920 BIS 980 NM AN EINEM BRENNNESSELSPEKTRUM VOM 14.05.08. 122	122
ABBILDUNG ANH. 8:	NÄHRSTOFFGEHALTE [MG/KG] DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2008 IM JAHR 2008 (TYP BR, WÖNT, WÖHF UND WÖKÖ) – TEIL 1	123
ABBILDUNG ANH. 9:	NÄHRSTOFFGEHALTE [MG/KG] DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2008 IM JAHR 2008 (TYP BR, WÖNT, WÖHF UND WÖKÖ) – TEIL 2.	123
ABBILDUNG ANH. 10:	SCHWERMETALLGEHALTE [MG/KG] DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2008 IM JAHR 2008 (TYP BR, WÖNT, WÖHF UND WÖKÖ) SOWIE DEREN GRENZWERTE DER BBODSCHV - TEIL 1.	124
ABBILDUNG ANH. 11:	SCHWERMETALLGEHALTE [MG/KG] DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2008 IM JAHR 2008 (TYP BR, WÖNT, WÖHF UND WÖKÖ) SOWIE DEREN GRENZWERTE DER BBODSCHV - TEIL 2.	124
ABBILDUNG ANH. 12:	BOXPLOTS DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR AS, CD, CR, CU, NI, ZN DES GEFÄßVERSUCHS 2007 IM JAHR 2007.	125
ABBILDUNG ANH. 13:	HISTOGRAMME MIT NORMALVERTEILUNGSKURVEN DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR AS, CD, CR, CU, NI, ZN DES GEFÄßVERSUCHS 2007 IM JAHR 2007	126
ABBILDUNG ANH. 14:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNGSKURVE DER NÄHRSTOFFANALYSEN FÜR P DES GEFÄßVERSUCHS 2007 IM JAHR 2007	127
ABBILDUNG ANH. 15:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNGSKURVE DER CHLOROPHYLLMESSUNGEN (SPAD) DES GEFÄßVERSUCHS 2007 IM JAHR 2007.	127
ABBILDUNG ANH. 16:	BOXPLOTS DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR AS, CD, CR, CU, NI, PB, ZN DES GEFÄßVERSUCHS 2007 IM JAHR 2008. 128	128
ABBILDUNG ANH. 17:	HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNGSKURVE DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR AS, CD, CR, CU, NI, PB, ZN DES GEFÄßVERSUCHS 2007 IM JAHR 2008.	129
ABBILDUNG ANH. 18:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNGSKURVE DER NÄHRSTOFFANALYSEN FÜR P UND K DES GEFÄßVERSUCHS 2007 IM JAHR 2008.	130
ABBILDUNG ANH. 19:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNGSKURVE DER CHLOROPHYLLMESSUNGEN (SPAD) DES GEFÄßVERSUCHS 2007 IM JAHR 2008.	130
ABBILDUNG ANH. 20:	SCHWERMETALLGEHALTVERTEILUNG [MG/KG] NACH STANDORTEN FÜR CD, CR, NI, PB, ZN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.	131
ABBILDUNG ANH. 21:	CHLOROPHYLLWERTVERTEILUNG (SPAD) NACH STANDORTEN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008. 131	131
ABBILDUNG ANH. 22:	BOXPLOTS DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR AS, CD, CR, CU, NI, PB, ZN DES GEFÄßVERSUCHS 2008 IM JAHR 2008. 132	132
ABBILDUNG ANH. 23:	HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNGSKURVE DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR AS, CD, CR, CU, NI, PB, ZN DES GEFÄßVERSUCHS 2008 IM JAHR 2008.	133
ABBILDUNG ANH. 24:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNGSKURVE DER NÄHRSTOFFANALYSEN FÜR P UND K DES GEFÄßVERSUCHS 2008 IM JAHR 2008.	134
ABBILDUNG ANH. 25:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNGSKURVE DER CHLOROPHYLLMESSUNGEN (SPAD) DES GEFÄßVERSUCHS 2008 IM JAHR 2008.	134
ABBILDUNG ANH. 26:	SCHWERMETALLGEHALTVERTEILUNG [MG/KG] NACH STANDORTEN FÜR CD, CR, NI, PB, ZN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2008 IM JAHR 2008.	135
ABBILDUNG ANH. 27:	NÄHRSTOFFGEHALTVERTEILUNG FÜR K [MG/KG] NACH STANDORTEN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2008 IM JAHR 2008. 135	135
ABBILDUNG ANH. 28:	CHLOROPHYLLWERTVERTEILUNG (SPAD) NACH STANDORTEN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2008 IM JAHR 2008. 136	136

ABBILDUNG ANH. 29:	ANALYSEDATENPUNKTE VON 2007 BIS 2009 IM UNTERSUCHUNGSGEBIET „SCHLEUSENHEGER WIESEN“ BEI WÖRLITZ (DATENGRUND AISA EAGLE 2008).....	137
ABBILDUNG ANH. 30:	BOXPLOTS DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR AS, CD, CR, CU, NI, PB, ZN DES FELDVERSUCHS 2007 UND 2008.	139
ABBILDUNG ANH. 31:	HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNG DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR AS, CD, CR, CU, NI, PB, ZN DES FELDVERSUCHS 2007 UND 2008.....	140
ABBILDUNG ANH. 32:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNG DER NÄHRSTOFFANALYSEN FÜR P UND K DES FELDVERSUCHS 2007 UND 2008.	141
ABBILDUNG ANH. 33:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNG DER CHLOROPHYLLMESSUNGEN (SPAD) DES FELDVERSUCHS 2007 UND 2008.	141
ABBILDUNG ANH. 34:	BOXPLOTS DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR AS, CD, CR, CU, NI, PB, ZN DER HYMAP 2008-KAMPAGNE.	142
ABBILDUNG ANH. 35:	HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNG DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR AS, CD, CR, CU, NI, PB, ZN DER HYMAP 2008-KAMPAGNE.	143
ABBILDUNG ANH. 36:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNG DER NÄHRSTOFFANALYSEN FÜR P UND K DER HYMAP 2008-KAMPAGNE.	144
ABBILDUNG ANH. 37:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNG DER CHLOROPHYLLMESSUNGEN (SPAD) DER HYMAP 2008-KAMPAGNE.	144
ABBILDUNG ANH. 38:	BOXPLOTS DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR CD, CR, CU, HG, NI, PB, ZN DER HYMAP 2009-KAMPAGNE.	145
ABBILDUNG ANH. 39:	HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNG DER SCHWERMETALLANALYSEN FÜR CD, CR, CU, HG, NI, PB, ZN DER HYMAP 2009-KAMPAGNE.	146
ABBILDUNG ANH. 40:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNG DER NÄHRSTOFFANALYSEN FÜR P UND K DER HYMAP 2009-KAMPAGNE.	147
ABBILDUNG ANH. 41:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNG DER CHLOROPHYLLMESSUNGEN (SPAD) DER HYMAP 2009-KAMPAGNE.	148
ABBILDUNG ANH. 42:	BOXPLOTS UND HISTOGRAMM MIT NORMALVERTEILUNG DER LIGNIN- UND WASSERGEHALTSMESSUNGEN DER HYMAP 2009-KAMPAGNE.	149
ABBILDUNG ANH. 43:	NÄHRSTOFFGEHALTVERTEILUNG FÜR P, K UND N [MG/KG] NACH STANDORTEN DER HYMAP 2009-KAMPAGNE.	149
ABBILDUNG ANH. 44:	VARIATIONSKOEFFIZIENTEN DER UNTERSUCHTEN BIOCHEMIEINDIZES DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.	154
ABBILDUNG ANH. 45:	VARIATIONSKOEFFIZIENTEN DER UNTERSUCHTEN PIGMENTINDIZES DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 – TEIL 1.	154
ABBILDUNG ANH. 46:	VARIATIONSKOEFFIZIENTEN DER UNTERSUCHTEN PIGMENTINDIZES DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 – TEIL 2.	155
ABBILDUNG ANH. 47:	VARIATIONSKOEFFIZIENTEN DER UNTERSUCHTEN PIGMENTINDIZES DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008 – TEIL 3.	155
ABBILDUNG ANH. 48:	VARIATIONSKOEFFIZIENTEN DER ENTWICKELTEN METHODEN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008	156
ABBILDUNG ANH. 49:	BEZIEHUNG ZWISCHEN DEM SCHWERMETALLGEHALT PB UND CU [MG/KG] DES BODENS UND DER PFLANZE DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.	158
ABBILDUNG ANH. 50:	KARTE DES SCHWERMETALLKONTAMINATIONSGRADES (METHODE CR1725) DER MULDEAUENVEGETATION MIT PUNKTHAFTEN ANALYSEDATEN BEI LÖBNITZ.	167
ABBILDUNG ANH. 51:	KARTE DES SCHWERMETALLKONTAMINATIONSGRADES (METHODE CR1725) DER MULDEAUENVEGETATION BEI LÖBNITZ.	168
TABELLE ANH. 1:	RÖNTGENFLUORESCENZANALYSEERGEBNISSE VOM 28.03.2007 DER BODENTYPEN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE VON 2007.	122
TABELLE ANH. 2:	RÖNTGENFLUORESCENZANALYSEERGEBNISSE VOM 21.04.2008 DER BODENTYPEN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE VON 2008.	122
TABELLE ANH. 3:	DESKRIPTIVE STATISTIK DER GEFÄßREIHE 2007 JAHR 2007.	125
TABELLE ANH. 4:	NORMALVERTEILUNGSTEST VON DEN ELEMENTEN AS, CD, CR, CU, K, NI, P, PB, SPAD, ZN FÜR DIE GEFÄßVERSUCHSREIHEN 2007 IM JAHR 2008 (LINKS) UND FÜR DIE GEFÄßVERSUCHSREIHEN 2008 IM JAHR 2008 (RECHTS)....	136
TABELLE ANH. 5:	DESKRIPTIVE STATISTIK DER HYMAP 2008-KAMPAGNE.	138
TABELLE ANH. 6:	DESKRIPTIVE STATISTIK DER ANALYSEDATEN 2007 UND 2008 AUS DEM FELDVERSUCH.....	138

TABELLE ANH. 7: ANWENDBARKEIT VON METHODEN DER PARAMETRISIERUNG VON FERNERKUNDUNGSDATEN (HYMAP, AISA EAGLE, LANDSAT 7 ETM+).....	150
TABELLE ANH. 8: VARIATIONSKOEFFIZIENT Cv [%] DER METHODEN IN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM GESAMTEN MESSZEITRAUM 2008 ALLER PFLANZEN.....	151
TABELLE ANH. 9: VARIATIONSKOEFFIZIENT Cv [%] DER METHODEN IN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 ZWISCHEN DEN BODENTYPEN (A, B, C) IM MESSZEITRAUM 2008 ALLER PFLANZEN.	152
TABELLE ANH. 10: VARIATIONSKOEFFIZIENT Cv [%] DER METHODEN IN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM MESSZEITRAUM 2008 (AUFGESCHLÜSSELT) ALLER PFLANZEN.	153
TABELLE ANH. 11: INTERKORRELATIONEN (PEARSON UND SPEARMAN KORRELATIONSKOEFFIZIENT) ZWISCHEN DEN UNTERSUCHTEN PARAMETERN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.	156
TABELLE ANH. 12: INTERKORRELATIONEN (PEARSON UND SPEARMAN KORRELATIONSKOEFFIZIENT) ZWISCHEN DEN UNTERSUCHTEN PARAMETERN DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2008 IM JAHR 2008.	157
TABELLE ANH. 13: INTERKORRELATIONEN (PEARSON UND SPEARMAN KORRELATIONSKOEFFIZIENT) ZWISCHEN DEN UNTERSUCHTEN PARAMETERN HYMAP-KAMPAGNE 2008.	157
TABELLE ANH. 14: INTERKORRELATIONEN (PEARSON UND SPEARMAN KORRELATIONSKOEFFIZIENT) ZWISCHEN DEN UNTERSUCHTEN PARAMETERN HYMAP-KAMPAGNE 2009.....	157
TABELLE ANH. 15: KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN (NACH PFLANZENART, PEARSON) DER SPEKTRALMETHODEN UND DES RELATIVEN CHLOROPHYLLGEHALTS (SPAD).	158
TABELLE ANH. 16: KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN (NACH PFLANZENART, SPEARMAN) DER SPEKTRALMETHODEN UND DES RELATIVEN CHLOROPHYLLGEHALTS (SPAD).	159
TABELLE ANH. 17: KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN DER SPEKTRALMETHODEN (NACH PFLANZENART, PEARSON) UND DES SCHWERMETALLGEHALTS (AS, CD, CR, CU, NI, PB, ZN).	161
TABELLE ANH. 18: KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN DER SPEKTRALMETHODEN (NACH PFLANZENART, PEARSON) UND DES SCHWERMETALLGEHALTS (AS, CD, CR, CU, NI, PB, ZN).	162
TABELLE ANH. 19: MITTLERER KORRELATIONSKOEFFIZIENT (PEARSON) DER SPEKTRALMETHODEN UND DER SCHWERMETALLGEHALTE (CR, CU, HG, NI) DER MESSPUNKTE VON 2009 DER BRENNNESSEL- UND ROHRGLANZGRASPFLANZEN.....	163
TABELLE ANH. 20: MITTLERER KORRELATIONSKOEFFIZIENT (SPEARMAN) DER SPEKTRALMETHODEN UND DER SCHWERMETALLGEHALTE (CR, CU, HG, NI) DER MESSPUNKTE VON 2009 DER BRENNNESSEL- UND ROHRGLANZGRASPFLANZEN.....	164
TABELLE ANH. 21: KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN DER SPEKTRALMETHODEN (NACH PFLANZENART, PEARSON) UND DES NÄHRSTOFFGEHALTS (P, K) DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.....	165
TABELLE ANH. 22: KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN DER SPEKTRALMETHODEN (NACH PFLANZENART, SPEARMAN) UND DES NÄHRSTOFFGEHALTS (P, K) DER GEFÄßVERSUCHSREIHE 2007 IM JAHR 2008.....	166

Abkürzungsverzeichnis

ACI	Anthocyanin Content Index
Ag	Silber
AISA	<i>Airborne Imaging Spectrometer for Applications</i>
ARI	Anthocyanin reflectance index
As	Arsen
ASD	<i>Analytical Spectral Devices</i>
ATP	Adenosintriphosphat
AVIRIS	<i>Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer</i>
Ba	Barium
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BMBF	Bundesministeriums für Bildung und Forschung
CAI	Cellulose Absorption Index
Cars	Karotinoide
CASI	<i>Compact Airborne</i> spektrographische Imager
Cd	Cadmium
Chl	Chlorophyll
Co	Kobalt
Cr	Chrom
CR	<i>Continuum Removal</i>
Ctr1	Carter Index 1
Ctr2	Carter Index 2
Cu	Kupfer
Cv	Variationskoeffizient
DLR	Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DVI	Difference Vegetation Index
SR	<i>Simple ratio</i>
DWD	Deutscher Wetterdienst
DWSI-5	Disease Water Stress Index 5
EGFN	Edge-green first derivative normalized difference
Fe	Eisen
FE	Fernerkundung
FFH	Fauna-Flora-Habitat
FMVO	Futtermittelschutzverordnung
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>
GFZ	Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum
GGFN	Green-green first derivative normalized difference
GIS	Geoinformationssystem
GP	<i>Green peak</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
Hg	Quecksilber
HyMap	<i>Hyperspectral Mapper</i>
ICP-AES	<i>Inductively coupled plasma optical atomic spectrometry</i>
ICP-MS	<i>Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry</i>
IDB	Indexdatenbank
K	Kalium
KA	Kartieranleitung
LAI	Leaf area index
Lat	Latitude
LAU	Landesamt für Umweltschutz
LCA	Lignin Cellulose Absorption Index
LCI	Leaf Chlorophyll Index
Lon	Longitude
M ü. NN	Meter über Normalnull
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index
mD705	Modified Normalized difference index (mND705)

MLU	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Mn	Mangan
MSI	Moisture Stress Index (MSI)
MW	Mittelwert
N	Stickstoff
Na	Natrium
NAPH	Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat
ND	<i>Normalised difference</i>
NDII	Normalized Difference Infrared Index (NDII)
NDLI	Normalized Difference Lignin Index (NDLI)
NDMI	Normalized Difference Moisture Index (NDMI)
NDNI	Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI)
NDPI	Normalized Difference Pigment Index (NDPI)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
NDWI	Normalized Difference Water Index (NDWI)
Ni	Nickel
NIR	Nahes Infrarot
NPCI	Normalized Pigment Chlorophyll Index (NPCI)
NPQI	Normalized Phaeophytinization Index (NPQI)
P	Phosphat
Pb	Blei
PRI	Photochemical Reflectance Index (PRI)
PS	Photosystem
PSNDc	Pigment-specific Normalised Difference Index PSNDc
PSRI	Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)
PWC	<i>Plant water content</i>
REIP	<i>Red edge inflection point</i>
REP	<i>Red edge position</i>
RT	<i>Red trough</i>
RVI	Ratio Vegetation Index (RVI)
RVSI	Red-edge Vegetation Stress Index (RVSI)
S	Schwefel
SAM	<i>Spectral angle mapper</i>
SIPI	Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)
SIXI	Structurally independent xanthophyll index (SIXI)
SM	Schwermetall
SNR	<i>Signal to noise ratio</i>
SRPI	Simple Ratio Pigment Index (SRPI)
StAbw	Standardabweichung
SWIR	Short wave infrared
TrinkWV	Trinkwasserverordnung
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
VIS	sichtbare Spektrum
WBI	Water Band Index (WBI)
WGS	<i>World Geodetic System</i>
Zn	Zink

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist in enger Zusammenarbeit mit der Sektion Bodenforschung unter der Leitung von Herrn Prof. Neue sowie Herrn Prof. Jörg Rinklebe (heute Bergische Universität Wuppertal) und der Fachgruppe für Geofernerkundung und Kartographie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg entstanden.

Für den entscheidenden Impuls und damit die Ermöglichung meiner Promotion sowie für die Betreuung während des Bearbeitungszeitraums möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. Cornelia Gläßer bedanken.

Für die finanzielle Förderung im Rahmen eines Promotionsstipendiums sowie für den fachlichen Austausch während der interdisziplinären Seminare danke ich der Deutschen Bundesumweltstiftung Umwelt (DBU), insbesondere meiner Betreuerin Frau Nicole Freyer.

Meinem Freund Dr. András Jung danke ich für die fachliche Betreuung meiner Forschungsarbeit sowie für die Schaffung einer mehr als kollegialen Arbeitsatmosphäre.

Für die Aufstellung und Organisation der Gefäßversuche durch Frau Dr. Ines Merbach und ihre Mitarbeiterinnen sowie für die umfangreiche Schwermetallanalyse durch Herrn Dr. Rainer Wennrich möchte ich mich bedanken. Ohne deren Hilfe hätte keine so große Datenlage für diese Arbeit zur Verfügung gestanden.

Vielen Kollegen aus interdisziplinären Arbeitsbereichen (Dr. Angela Lausch, Dr. Birgit Heim, Dr. Mark Overesch, Dr. Stefan Erasmi, Jaromir Borzuchowski, Klaus Hempel, Marion Pause, Prof. Dr. Hendrik Kuepper, Prof. Dr. Klaus Humbeck, Verena Henrich) möchte ich danken für ihre Diskussionsbereitschaft und zahlreichen wissenschaftlichen Ratschläge.

Allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe Geofernerkundung und Kartographie am Institut für Geowissenschaften in Halle danke ich für die freundliche und angenehme Arbeitsatmosphäre.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir ein behutsames Leben sowie das Studium ermöglicht und mich in jeder Hinsicht unterstützt haben. Dafür widme ich ihnen diese Arbeit.

Am meisten danke ich meiner Freundin Hannah für ihre moralische Unterstützung und Liebe während der Arbeitsphase meiner Promotion. Schön, dass es dich gibt.

1. Einleitung

1.1 Motivation

In den letzten Jahren ist eine Verstärkung der Häufigkeit und Intensität der Hochwässer in großen Teilen Europas zu verzeichnen (Becker & Grunewald, 2003; Kundzewicz et al., 2005; Milly et al., 2002). Ebenso prognostizieren u.a. Lehner et al. (2006) sowie Dankers & Feyen (2008) für den nördlichen Teil Europas ein erhöhtes Risiko an Extremwasserereignissen. Aufgrund der häufig durch Altindustrie und Altbergbau sowie durch intensive Landwirtschaft und urbane Strukturen geprägten Nutzungen in vielen Flusseinzugsgebieten Mitteleuropas sind die durch die Hochwässer mitgeführten Sedimentfrachten stark schadstoffbelastet. Das Hochwasser sorgt durch Unterspülung, Überflutung und Erosion für die Freisetzung unterschiedlicher Kontaminanten (Geller, et al., 2004).

Aufgrund der Extremhochwasser an der Elbe 2002 und 2006 werden die Auswirkungen auf die Umwelt thematisiert. Es bestehen umfassende Untersuchungen zur stofflichen Belastung des Wassers, der Sedimente und der Böden im Einzugsgebiet der Elbe (Friese, et al., 2000; Prange, et al., 2000) und Mulde (Beuge, et al., 1999). Dabei fungieren die Halden des Erzbergbaus und des Braunkohletagebaus, die industriellen Altlasten im Großraum Bitterfeld und die ehemaligen Bereiche der chemischen Produktionsbetriebe als potentielle Schadstoffquellen im Flusseinzugsgebiet (Geller, et al., 2004).

Die Schadstoffauswertungen nach dem Hochwasser von 2002 im Rahmen des Ad-hoc-Projektes „Schadstoffbelastung nach dem Elbe-Hochwasser 2002“ (BMBF-FKZ PTJ 0330492) zeigten teils stark erhöhte Bodenkontaminationen durch diverse Schwermetalle. Ebenso haben Untersuchungen von RINKLEBE et al. (1999; 2006) ergeben, dass die Vorsorgewerte nach der Bundes-Bodenschutzverordnung (Holzwarth, et al., 2000) sowie die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkWV, 2001) im Grundwasser im Bereich der Schwermetallgesamtgehalte teilweise erheblich überschritten wurden. Damit ist die uneingeschränkte Nutzung der Weiden- und Ackerflächen nicht mehr gewährleistet und auch der Transfer in die Nahrungskette kann nicht ausgeschlossen werden (FMVO, 2000).

Der Untersuchungsraum liegt im Gebiet des Biosphärenreservats Mittel Elbe, dessen nachhaltiger Schutz des naturnahen Ökosystems ein Ziel des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG, 2002) ist. Ebenso befinden sich in unmittelbarer Nähe die FFH-Gebiete „Mulde oberhalb Pouch“, „Dessau-Wörlitzer Elbauen“ und „Elbaue Steckby-Lödderitz“ (FFH-Richtlinie, 1992). Die betroffenen gesetzlichen Grundlagen zur Bewertung der Gefährdung der aktuellen Situation der Elb- und Mulde zeigt die Abbildung 1.1. Es ergibt sich neben den aktuellen punktuellen Analysen ein Forschungsbedarf im Hinblick auf eine flächenhafte Ausweisung der kontaminierten Bereiche der Flussaue, insbesondere nach zukünftigen Hochwassern. Dabei wird geprüft, ob die hyperspektrale Fernerkundung für diese Fragestellung genutzt werden kann und damit ein Werkzeug zur Realisierung eines flächendeckenden Schutzes der biotischen und abiotischen Naturgüter ist.

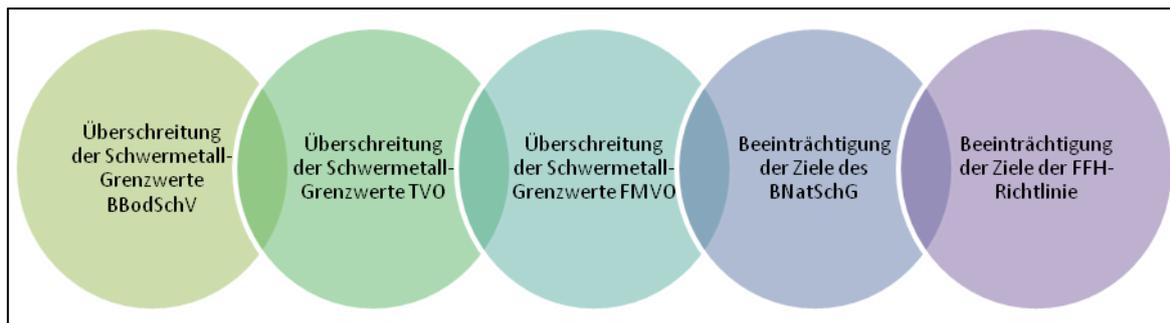


Abbildung 1.1: Gesetzliche Grundlagen zur Bewertung der Gefährdung der aktuellen Situation der Elb- und Muldeare .

1.2 Zielstellung

Ziel der Forschungsarbeit ist es, mit Hilfe von spektrometrischen Feld- und Labormessungen den aktuellen Belastungszustand des Auenökosystems zu beurteilen. Dabei werden die ökotoxikologischen Effekte der Böden indirekt aus den spektralen Eigenschaften der Auenvegetation abgeleitet und Algorithmen zur Parametrisierung bzw. Trennung von Stressmerkmalen bei der Auenvegetation entwickelt. Mit verschiedenen Vegetationsindizes, Methoden zur Red-Edge-Position-Bestimmung sowie der Funktionsanalyse wird die Spektralkurve der Vegetation normiert, um das Potenzial der Methoden zur Detektion von Schwermetall-Stress in Auenpflanzen zu untersuchen. Eine Validierung der daraus resultierenden Schadensklassifikation erfolgt durch analytische Untersuchungen. Mit der Bestimmung des Chlorophyll- und Schwermetallgehaltes können Pflanzenparameter einerseits und Indikatoren der Bodengüte andererseits ermittelt werden, die für eine nachhaltige Nutzung und den Schutz der Böden dringend notwendig sind. Es werden außerdem verschiedene hyperspektrale abbildende Spektrometer aus den Basismessungen simuliert. Dabei ist die Übertragbarkeit von den punkthaften spektrometrischen Messungen auf die in der Forschungsarbeit zur Verfügung stehenden Fernerkundungsdaten zur flächendeckenden Analyse belasteter bzw. kontaminierter Auenstandorte zu untersuchen. Die Ziele für die Forschungsarbeit sind:

- Analyse des spektralen Verhaltens von Auenpflanzen unter Schwermetallstress mittels spektrometrischen Messungen zu verschiedenen phänologischen Zeiträumen
- Normierung der stressinduzierten Belastungen an der Reflexionskurve durch Methoden zur Bestimmung von Vegetationsparametern
- Ermittlung von optimalen Zeitfenstern für spektrometrische Messungen und Aufnahmen von Fernerkundungsdaten in schwermetallbelasteten Auengebieten
- Korrelation zwischen dem physiologischen Zustand (Pigment-, Nährstoff- und Schwermetallgehalt) und den normierten Spektralmerkmalen der Pflanzen
- Algorithmusentwicklung zur Detektion und Trennung von Schwermetallstress bei Pflanzen
- Übertragung des Algorithmus auf abbildende Fernerkundungsdaten (AISA, HyMap)
- Erstellung von thematischen Karten mit Schwermetallbelastungsstufen im Untersuchungsgebiet

1.3 Stand der Wissenschaft

Die beschriebenen aktuellen Probleme der Auengebiete wurden im Kontext mit dem aktuellen Stand der wissenschaftlichen Forschung im Bereich der spektralen Veränderungen von Pflanzen bei Schwermetallstress sowie der referierten Methoden der Fernerkundung zur Stressdetektion diskutiert, um den Forschungsbedarf zu extrahieren und Ziele der Arbeit abzuleiten. Daneben wurden explizit die Grundlagen interdisziplinärer Themenbereiche wie die Pflanzen- und Stressphysiologie sowie das Verhalten von Schwermetallen in Boden und Pflanze behandelt. Die Auseinandersetzung mit der Literatur bildet die Basis für die Anlage des Versuchsaufbaus sowie die Methodenentwicklung.

1.3.1 Stressphysiologie

Die Detektion und Klassifikation von Vegetationsstress bzw. Schäden mittels Fernerkundungsdaten bedingt Kenntnisse im Bereich der Pflanzen- und Stressphysiologie. Nach LARCHER (2001) wird der Stressbegriff definiert als Belastungszustand bzw. als eine außergewöhnliche Abweichung vom Lebensoptimum, die zunächst reversible Veränderungen und Reaktionen auf allen Funktionsebenen des Organismus bewirkt, dann aber auch bleibende Folgen verursachen kann. Der Begriff wird differenziert nach dem Stressfaktor (Stressor) und der Stressreaktion (Stresszustand, Anspannungszustand). Die Stressreaktion kann restabilisierend und resistenzfördernd (Eustress) oder destabilisierend und destruktiv (Distress) sein. Der Zustand der Belastung kann unterschiedlich lange anhalten und wird danach in Kurzzeitstress oder diurnalen Stress, mittelfristigen Stress und permanenten Stress unterschieden.

Der Zusammenhang zwischen Reizauslöser und Reizantwort wird als spezifische Wirkungskette im patho- bzw. resistenzphysiologischen Sinne gesehen (Smidt, 2004). Folgende Phasen werden nach LARCHER (2001) unterschieden:

- die Alarmphase: nach Einsetzen der Störung kommt es zunächst zu einer Destabilisierung der strukturellen und der funktionellen Voraussetzungen für eine normale Lebenstätigkeit,
- die Restitutionsphase: führt zu einer Wiederherstellung des normalen Resistenzniveaus (Reparaturmaßnahmen),
- die Widerstandsphase: Abhärtung auch bei anhaltender Beanspruchung; bei gleichbleibend andauernder Belastung stabilisiert sich der Organismus (Anpassung) und
- die Erschöpfungsphase: tritt ein, wenn der Stresszustand lange anhält oder die Belastung zunimmt (Abbildung Anh. 1).

Die Belastungsfaktoren (Stressoren) für Pflanzen können biotischer oder abiotischer Herkunft sein (Libbert, 1993) (Abbildung 1.2).

Infolge der chemischen Belastung durch Schwermetalle treten chronische Schädigungen auf, die sichtbare Veränderungen hervorrufen. Bei niedriger, langsamer, aber andauernder Stresseinwirkung auf die Pflanze zeigen sich Veränderungen wie Nekrosen, Vergilbung oder Blattverlust. Bei akut auftretendem Stress tritt die Erschöpfungsphase relativ schnell ein und führt zu irreversiblen Zerstörungen bis hin zum Absterben der Pflanze. Dazu kommen die nicht sichtbaren Veränderungen innerhalb der Pflanze. Diese latenten physiologischen Störungen zeigen sich unter anderem in der Leistung der Stoffwechselforgänge, in

Hormonausstößen und Veränderungen des Pigmentgehalts. Dadurch wird der Energiestatus gesenkt und das Wachstum verlangsamt (Larcher, 2001).

Stress wirkt sich unterschiedlich auf die Spezies aus, so dass jede Pflanze anders resistent gegenüber Schadeinwirkungen ist. Die Widerstandsfähigkeit des Individuums ist unterschiedlich belastbar. Die Pflanzen verfügen über eine Vielzahl von Anpassungsstrategien, um Stresseffekten entgegenzuwirken.

Die zwei Hauptstrategien, die die höheren Pflanzen (Gefäßpflanzen) benutzen, sind Stressflucht (*escape*) und Stressresistenz (*resistance*). Im ersten Fall schließen die Pflanzen ihre Reife vor dem Eintritt des gefährlichen Stresses ab. Stressresistenz lässt sich in Stressvermeidung (*avoidance*) und Stresstoleranz (*tolerance*) einteilen (Levitt, 1972; Tahiro, 2002). Die Pflanzen sind durch die spezifischen Stresstrategien befähigt/ nicht befähigt, bei verschiedenen Umweltbedingungen zu überleben. Das Zusammenspiel verschiedener Stressoren bedingt für jede Art ein bestimmtes Optimum des Lebens und somit ein bestimmtes Artenareal bzw. „Nische“.

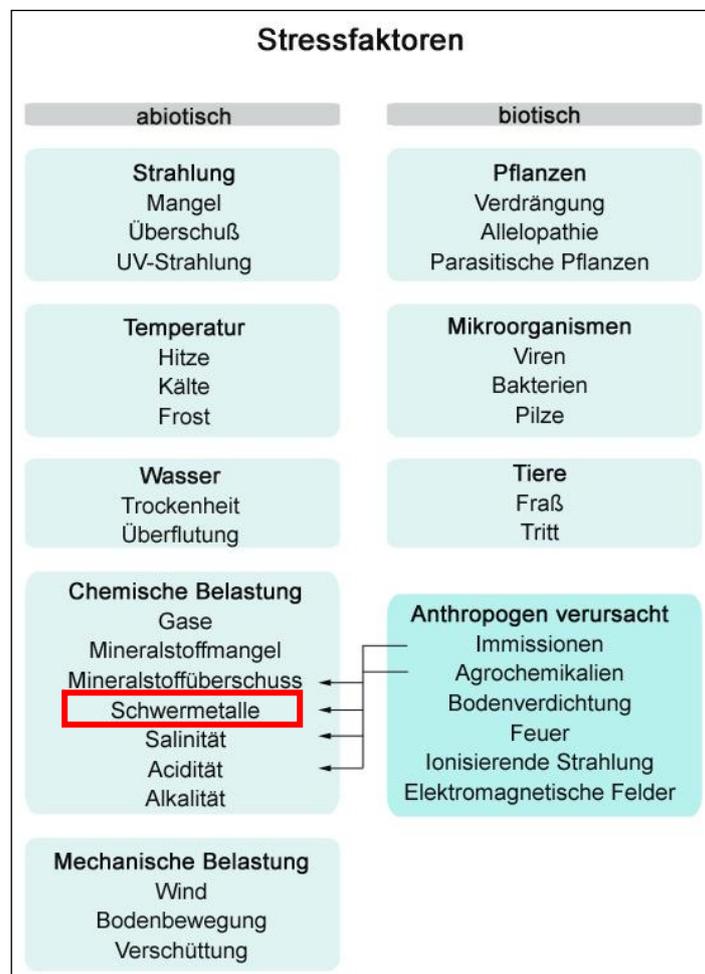


Abbildung 1.2: Stressfaktoren bei Pflanzen (Brunold, et al., 1996).

1.3.2 Schwermetalle im Boden

Schwermetalle schaffen besonders Langzeitprobleme, weil sie sich in Organismen akkumulieren, dadurch in Stoffkreisläufen zirkulieren und in sedimentierter Form noch lange in toxischen Konzentrationen im Ökosystem verweilen können (Alloway, 1999). Der Begriff

„Schwermetall“ wird für Metalle verwendet, deren Dichte einen Wert von 5 bis 6 g/cm³ überschreitet. Das Metalloid Arsen (As) ist kein Schwermetall, wird aber im Folgenden zusammen mit den anderen untersuchten Elementen unter diesem Begriff zusammengefasst (Overesch, 2002).

Schwermetalle sind natürliche Bestandteile der Erdkruste und gelangen mit der Gesteinsverwitterung in den Boden (geochemische Herkunft). Bestimmt wird der Schwermetallgehalt durch den Silicium-Anteil des Gesteins. Mit zunehmendem Silicium-Anteil nimmt der Schwermetallgehalt ab. Durch pedogenetische Prozesse werden Schwermetalle aus ihren Ausgangsmaterialien durch die Verwitterung freigesetzt und von Bodenkomponenten wie Tonmineralen, Hydroxiden und organischem Material gebunden. Die substratspezifische geogene Grundbelastung fällt in der Regel gering aus und wird meist durch die anthropogenen Schwermetalleinträge übertroffen. (Overesch, 2002). Die anthropogene Schwermetallkontamination erfolgt durch Erzbergbau und Verhüttung, Verkehr, Ausbringung von Müll und Klärschlamm, Flugstaub (Aerosole) und Fabrikabwässer (Alloway, 1999).

Schwermetalle wirken bei Pflanzen nur in pflanzenverfügbarer Form. Die Aufnahme der Spurenelemente durch Pflanzen hängt von ihrer Löslichkeit ab (Wechselwirkung der Ionen zwischen der flüssigen und festen Phase im Bodensystem). Die Mobilität der Schwermetalle wird vorwiegend durch 2 Prozesse bestimmt (Adsorption und Fällung). Die Adsorption von Metallen im Boden wird durch die Größe und Ladung der Ionen und die Austauschkapazität des Bodens beeinflusst. Als Adsorber treten Tonminerale, pedogene Oxide und Hydroxide sowie die organische Bodensubstanz auf (Scheffer, et al., 2002; Alloway, 1999). Unspezifisch adsorbierte Schwermetalle sind austauschbar und damit relativ mobil, während spezifisch adsorbierte Schwermetalle fest an die Oberflächen der Bodenpartikel gebunden und daher nicht austauschbar sind (Alloway, 1999).

Die Ausfällung wird insbesondere durch die Veränderung des pH-Wertes ausgelöst. Während bei neutraler Bodenreaktion die spezifische Adsorption von Metall-Hydroxokomplexen überwiegt, werden diese bei zunehmender Bodenacidität aufgelöst und die Schwermetalle somit mobilisiert. (Herms, et al., 1984; Blume, 2004; Alloway, 1999).

Die Mobilisierung von Schwermetallen bei abnehmenden pH-Werten verläuft meist nicht kontinuierlich, sondern setzt erst bei Unterschreitung bestimmter pH-Werte verstärkt ein. Tabelle 1.1 zeigt die entsprechenden Grenz-pH-Werte für die verschiedenen Elementen.

Tabelle 1.1: PH-Werte für die beginnende Mobilisierung verschiedener Metalle in Böden (aus BLUME, 2004).

Element	Cd	Zn	Ni	Cu	As	Cr	Pb	Hg
Grenz-pH	6,5	6-5,5	5,5	4,5	4,5-4	4,5-4	4	4

Die organische Bodensubstanz bindet Schwermetalle überwiegend durch phenolische OH- und Carboxyl-Gruppen. Sie adsorbiert Schwermetalle zudem in metallorganischen Komplexen (Chelate) (Overesch, 2002).

Außerdem wird die Verfügbarkeit durch den Gesamtgehalt der Schwermetalle, die Belastungsursache, die Anionen in der Bodenlösung und die Redoxverhältnisse gesteuert (Brunold, et al., 1996). Während OTTE (1993) das unterschiedliche Verhalten der Schwermetallaufnahme auf die verschiedenen Bodenformen und chemischen Spezifika im Boden zurückführt, zeigen Untersuchungen von BARONI (2004), dass die As-Aufnahme nicht von der organischen Substanz, dem Phosphorgehalt oder dem pH-Wert abhängig ist.

1.3.3 Schwermetalle in der Pflanze

Für Pflanzen sind Schwermetalle wichtig für die Lebensvorgänge, können aber auch hochtoxisch sein. Kupfer (Cu), Kobalt (Co), Zink (Zn), Nickel (Ni), Mangan (Mn) und Eisen (Fe) gehören zu den essentiellen Mikronährstoffen, die ab einer bestimmten Konzentration im Boden nachteilig wirken können. Von besonderer Bedeutung sind die grundsätzlich schädlichen Metalle wie Quecksilber (Hg), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Silber (Ag) und Chrom (Cr), die durch jahrhundertelangen Bergbau, industrielle Produktion und Abfälle ein Risiko für die Landwirtschaft und die menschliche Gesundheit darstellen. Über den Pfad Boden-Pflanze-Mensch findet der Transfer in die Nahrungskette statt (Prasad, 2004).

Ein phytotoxikologisches Problem entsteht erst, wenn bei bestimmten Schwermetallgehalten die Pflanzen selbst Schaden nehmen (Schwermetalltoleranz). Die Dosis-Wirkungsbeziehung in der Abbildung 1.3 zeigt einen Mangelbereich mit einer Mangelschwelle bei essentiellen Spurenelementen bis zum Toleranzplateau. Erst ab der Toxizitätsschwelle wird der Stoffwechsel geschädigt (Photosynthese, Pigmentabbau). In späteren Phasen beginnen auch äußerlich erkennbare Toxizitätssymptome wie Chlorosen, Nekrosen und Welkeerscheinungen. Bei den nicht-essentiellen Schwermetallen gibt es keine Mangelschwelle (Berry, et al., 1981; Brunold, et al., 1996; Sauerbeck, 1982).

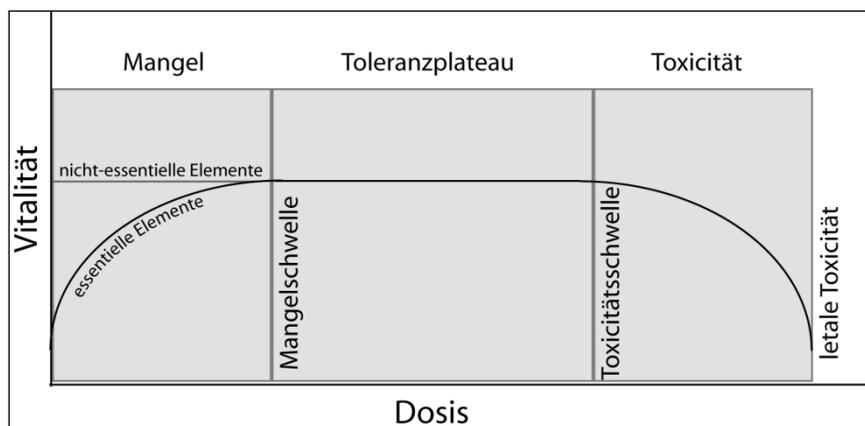


Abbildung 1.3: Dosis-Wirkungsbeziehung bei essentiellen und nicht-essentiellen Elementen für die Pflanze (Brunold, et al., 1996).

Die Grenzwerte für einzelne Pflanzen sind sehr variabel in der Literatur (Sauerbeck, 1982). Die Tabelle 1.2 zeigt die zusammengefassten, ertragsbezogenen Toxizitäts-Grenzbereiche für oberirdische Pflanzenteile. Die Schwermetallschädigungen von Pflanzen sind durch geeignete Bioindikatoren messbar, insofern sie mit Schwermetallanalysen verglichen werden.

Tabelle 1.2: Ertragsbezogene Bereiche der Pflanzentoxizität für einige Schwermetalle (nach SAUERBECK, 1982).

Element	Bereich	Versuchszahl
Cd	5-10	112
Cr	1-2	16
Cu	15-20	57
Hg	0,5-1	15
Ni	20-30	55
Pb	10-20	22
Zn	150-200	57

Die Metallionen werden bei höheren Landpflanzen hauptsächlich wie die Mikroelemente vom Boden über die Wurzeln in gelöster Form aufgenommen (Prasad, 2004). Die Schwermetall-Ionen werden mit denselben Transfer-Mechanismen wie andere Nährstoffe aufgenommen (Hock, et al., 1995). Dabei konkurrieren sie bei der Aufnahme durch die Wurzel mit diesen (Alloway, 1999). Die Aufnahme von Schwermetallen in die Pflanze verringert sich mit sinkender Mobilität der Elemente (siehe Tabelle 1.1). Sie wird auch bestimmt durch:

- die Konzentration und die chemische Spezies des Metalls in der Porenlösung,
- die Oberfläche der Wurzeln (erhöht durch symbiotische Pilze),
- die Veränderung der Bodenreaktion (Ansäuerung) oder Bildung von org. Komplexen innerhalb der Rhizosphäre (Wurzelexsudate) und
- den Massenfluss der Bodenlösung zur Wurzeloberfläche (Evaporationsrate) (Alloway, 1999).

Die Aufnahme erfolgt durch die Wurzelrinde bis an die Plasmamembranen. Dort kann die Absorption über eine passive oder aktive Aufnahme erfolgen. Wenn die Ionen erst einmal durch Wurzeln oder Blätter absorbiert und ins Xylem transportiert wurden, können sie sich in alle Pflanzenteile verlagern. Es unterscheiden sich die Schwermetallgehalte der verschiedenen Pflanzenorgane, wobei Früchte und Samen fast stets schwermetallärmer sind als die Blätter (Baroni, et al., 2004; Davis, et al., 1980). Die höchsten Gehalte finden sich in den Wurzeln. Die Umlagerung hängt vom Metall, vom Organ und vom Alter der Pflanze ab. Lübben & Sauerbeck (1991) beschreiben die Transferkoeffizienten für den Schwermetallübergang vom Boden in die Pflanze. Im Vergleich von Sproß- und Wurzelgehalten erweisen sich Ni, Cd, Zn und Pb als relativ mobil in den Pflanzen, während Cu, Cr und Hg überwiegend in den Wurzeln verbleiben (Kabata-Pendias, 2001; Petterson, 1976). Neben den Wurzeln können auch die Blätter Schwermetalle aufnehmen. Es handelt sich dabei überwiegend um eine Diffusion durch die Cuticula (Hock, et al., 1995). In den Blättern können Metallionen in Proteine eingelagert oder im Phloem in andere Pflanzenteile umgelagert werden (Overesch, 2002).

Die Funktionsstörungen, die durch toxische Schwermetallgehalte hervorgerufen werden, beruhen auf Membranschädigungen, Hemmung lebenswichtiger Enzyme, Bildung von Sauerstoffradikalen (oxidativer Stress) und Inaktivierung der Elektronentransporte der Atmung und Photosynthese (Abbildung 1.4). Außerdem wird die Aufnahme und Assimilation von Stickstoff und anderen Nährstoffen gestört und das Wachstum eingeschränkt (Yang, et al., 2007). Bei terrestrischen Pflanzen ist die Wurzel generell das erste Organ, das mit Schwermetallen in Kontakt kommt. Diese stehen in Konkurrenz in der Aufnahme mit weniger verfügbaren Spurenelementen. Vermutlich werden hierbei auch die Transportproteine und cytoplasmatische Enzyme gehemmt. Als Folge der Wurzeltoxizität

sterben zunächst die Wurzelhaare und Wurzelspitzen ab (Larcher, 2001; Taiz, et al., 2000; Küpper, et al., 1998). Der Mechanismus der Hemmung der Photosynthese wird durch die Substitution der Chlorophylle zu Schwermetall-Chlorophylle oder durch die direkte Inhibition im Photosystem II ausgelöst (Küpper, et al., 2002). Oxidativer Stress kann einmal direkt durch die Katalyse von redoxaktiven Metallionen und indirekt durch die Fehlfunktionen der Photosynthese und Atmungskette entstehen (Schützendübel, et al., 2002). Dabei können Lipide in Membranen oxidiert werden und somit zur Undichtigkeit führen (Küpper, et al., 2002).

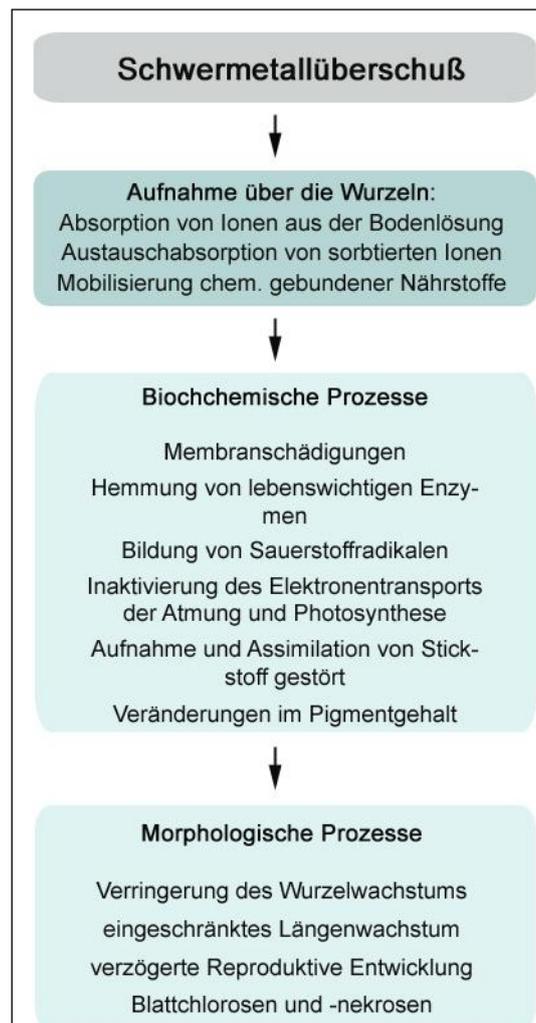


Abbildung 1.4: Biochemische und morphologische Prozesse in der Pflanze bei Schwermetallüberschuss.

Pflanzen belasteter Standorte wie Flussterrassen haben sich teilweise an hohe Schwermetallgehalte angepasst, indem sie die Aufnahme und Translokation von Schwermetallen vermeiden oder einschränken (Hock, et al., 1995). So werden zumindest die Gehalte in den oberirdischen Pflanzenorganen erheblich minimiert.

Es treten unterschiedliche Aufnahmevermögen von Art zu Art hinsichtlich der Schwermetalle auf. Hierbei wird unterschieden zwischen „(Hyper)-Akkumulatorpflanzen“, „Indikatorpflanze“ und schwermetall-ausschließenden „Exkluderpflanzen“.

Die Ersteren reichern Schwermetalle im Vergleich zu deren Konzentration im Boden erheblich an. Bei den Zweitgenannten wächst der Gehalt annähernd proportional zu

demjenigen im Nährsubstrat (Cole, et al., 1984). Die Exkluder akkumulieren die Schadstoffe vorwiegend in ihren Wurzeln, bis das Rückhaltevermögen erschöpft ist (Scheffer, et al., 2002).

Die physiologischen Mechanismen der Schwermetallresistenz von Pflanzen sind:

- die selektive Aufnahme von Ionen,
- die verringerte Permeabilität der Membranen,
- die Immobilisierung von Ionen in Wurzeln, Blättern und Samen,
- die Abscheidung der Ionen aus dem Stoffwechsel durch Ablagerung (Speicherung) in gebundener oder löslicher Form,
- die Veränderung des Stoffwechsels (Verstärkung von Enzymen und Metaboliten) und
- die Eliminierung der Ionen aus Pflanzen durch Herauswaschen aus Blättern, durch Blattabwurf und Exkretion aus Blättern und Wurzeln.

Um eine Hemmung der Wurzelaktivität zu vermeiden, wird die der unspezifischen Durchlässigkeit der Wurzel für unerwünschte Schwermetalle verringert (selektive Aufnahme). Aber auch eine aktive Ausschleusung von Ionen durch Efflux-Pumpen wurde untersucht (Overesch, 2002).

Resistenzmechanismen gegen oxidativen Stress sind die Verstärkte Expression von Enzymen (Stressproteine), die reaktive Sauerstoffspezies entgiften und der Umbau der Zellmembranen, um sie resistenter gegen den Angriff von reaktiven Sauerstoff-Spezies zu machen (Verringerter Anteil von Lipiden und erhöhter Anteil von stabilisierenden Proteinen in der Membran). Ebenso wird bei auftretender Wurzelhemmung erhöht Wasserstoffperoxid gebildet. Dieses aktiviert die Peroxidasen, die die Lignifikation in den Zellwänden verstärkt (Degenhardt, 2000; Degenhardt, et al., 2000). Yang et al. (2007) zeigten eine Maispflanze, die nach 48 h Cadmiumbelastung einen 4-fachen Anteil an Lignin aufwies. Die im Cytoplasma gebildeten Phytochelatine binden Metallionen (Kompartimentierung in der Vakuole) und schützen somit vor Metalltoxizität (Yang, et al., 2007).

1.3.4 Spektrales Verhalten von Pflanzen

Die Fernerkundung nutzt zur Erkennung und Identifizierung von Objekten der Erdoberfläche elektromagnetische Strahlungsvorgänge. Das Kontinuum von Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung wird in ein Spektrum aufgeteilt. Die Globalstrahlung wird von Oberflächen wie der Vegetation zum Teil absorbiert, reflektiert und transmittiert. Ihre Intensität und spektrale Zusammensetzung ist von physikalischen, chemischen und anatomischen Eigenschaften der Pflanzen abhängig (Hildebrandt, 1996). Das typische spektrale Verhalten von Pflanzen wird in einer Reflexionskurve vom sichtbaren bis zum mittleren Infrarot des elektromagnetischen Spektrums wiedergegeben und kann in drei Bereiche differenziert werden (Abbildung 1.5):

- 400-700 nm, der durch die Absorption der Blattpigmente beeinflusste Bereich des sichtbaren Lichts,
- 700-1300 nm, der durch das interne Streuungs- und Brechungsverhalten der Zell- und Gewebestrukturen bestimmte Bereich und
- 1300-2500 nm, der durch die Absorption von im Blattgewebe enthaltenem Wasser bestimmte Bereich (Swain, et al., 1978; Hese, 2001; Fuchs, 2003).

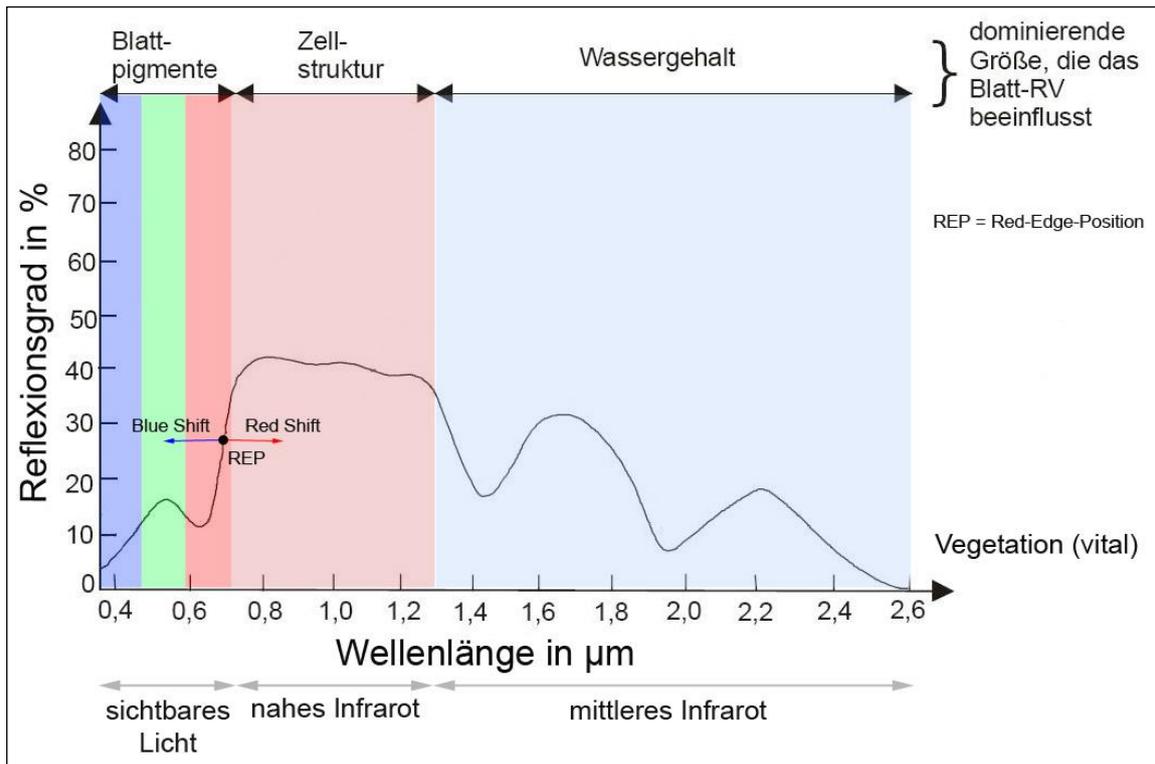


Abbildung 1.5: Typischer Reflexionsverlauf von Vegetation (nach SWAIN & DAVIS 1978).

Die spektrale Zusammensetzung der Reflexion von Blattorganen im sichtbaren Bereich von 0,4 µm bis 0,7 µm wird im Wesentlichen durch die Lichtabsorption der Pigmente der obersten Blattschicht bestimmt (FUCHS 2003, HESE 2001). Die Absorptionsmaxima liegen bei den Chlorophyllen, dem β -Karotin und dem Xanthophyll zwischen 0,42 und 0,49 µm. Um 0,65 µm im Rotbereich absorbieren nur die Chlorophylle (FELDWISCH et al. 2001) (Tabelle 1.3) (Abbildung 1.6). Diese Grundlagen sind wichtig für die spätere Anwendung von ausgewählten, diesen Bereich untersuchenden Methoden.

Tabelle 1.3: Pflanzenpigmente und ihr Absorptionsmaxima (nach KUMAR et al. 2001).

Pigmenttyp	Charakteristisches Absorptionsmaxima (nm)
Chlorophyll a	420, 490, 660
Chlorophyll b	435, 643
β -Karotin	425, 450, 480
α -Karotin	420, 440, 470
Xanthophyll	425, 450, 475

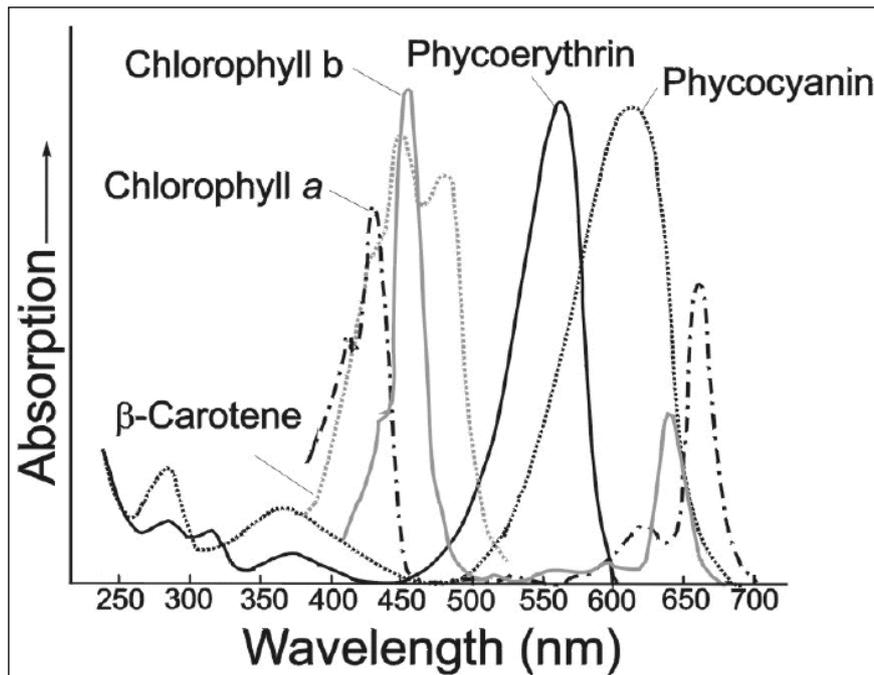


Abbildung 1.6: Absorptionskurven der Pflanzenpigmente (PURVES et al. 1998).

Der am meisten photosynthetisch aktive Bereich ist das Mesophyllgewebe mit seinen lichtabsorbierenden Pigmenten (ZARCO 2000). Als optisch dominierende Substanz gilt der Farbstoff Chlorophyll, ein Photorezeptor und ein bestimmender Faktor der Photosynthesekapazität (PINAR & CURRAN 1996). In den Chloroplasten wird die Lichtenergie von zwei Funktionseinheiten gesammelt, den sogenannten Photosystemen, die den Elektronentransport ermöglichen. Die Photosysteme PS II und PS I sind die Reaktionszentren bzw. Lichtsammelkomplexe der Photosynthese. Hauptzweck der Photosynthese ist die Herstellung von Kohlenhydraten aus Kohlendioxid. Diese Umwandlung wird aus den Produkten der Lichtreaktion wie ATP und NADH vollzogen. Der vielseitig verwendbare chemische Energieträger und Sauerstoff liefernde photochemische Prozess der Lichtreaktion der Photosynthese wird von LARCHER (2001) ausführlich erklärt. Mit Hilfe verschiedener theoretischer Modelle wurden die optischen Eigenschaften von Pflanzen simuliert und Korrelationen ermittelt, u. a. mit variierenden Chlorophyllkonzentrationen. Bei steigenden Gehalten dieses Pigments sank die Reflexion im sichtbaren Licht (VIS) ab (THIESSEN 2001). Bei intakten Blattorganen werden durch die Pigmente die blauen und roten Lichtanteile stärker absorbiert als die grünen (*green peak*), wodurch die Blätter ihre typische Farbe erhalten. Der Gehalt und die Zusammensetzung der Pigmente verändern sich während des typischen phänologischen Jahresverlaufs. Mit der herbstlichen Blattverfärbung der Laubbäume zeigt sich eine Verschiebung des Reflexionsmaximums zum roten Spektralbereich hin (BUSCHMANN & NAGEL 1992), d. h. der Chlorophyllgehalt nimmt ab und die dadurch vorher maskierten Karotinoide und Xanthophylle treten in Dominanz. STANFORD et al. (2003) beschreiben ein Ansteigen des Chlorophyllgehalts mit dem Alter der Nadelbäume und sowie eine dichtere interne Zellstruktur und zeigen somit eine weitere Abhängigkeit des spektralen Verhaltens von dem Zustand der Pflanze. Trockenrasenvegetation bzw. Gräser besitzen einen wesentlich geringeren Chlorophyllgehalt und zeigen sich in ihrer spektralen Signatur im Rotbereich mit höheren Reflexionswerten.

Ein weiteres Merkmal bei Pflanzenbeständen ist der maximale Anstieg der Reflexion vom sichtbaren Licht zum nahen Infrarot (680-740 nm), der so genannten Red-Edge-Position

(REP), die nachweislich durch den Chlorophyllgehalt bestimmt wird (Horler, et al., 1983; Boochs, et al., 1990; Clevers, et al., 2002). Mit abnehmendem Gehalt zeigt sich eine spektrale Verschiebung der REP zu kürzeren Wellenlängen hin als „blue shift“ (Baret, et al., 1990). Des Weiteren bestimmen Art, Vitalität, Wassergehalt, Blattschichtung und Entwicklungsstadium der Pflanze diesen Bereich (Horler, et al., 1983).

Ebenso treten Variationen im Spektralverlauf infolge eines Überangebotes oder eines Mangels an Schwermetallen auf. Diese können indirekt über die Vegetation gemessen und damit mögliche sekundäre Effekte wie Pflanzenstress detektiert werden.

Im nahen Infrarot zwischen 0,7 μm und 1,3 μm ist die Reflexion und Transmission vitaler Blätter hoch. Sie wird insbesondere durch den zellulären Aufbau des Blattes bestimmt und variiert zwischen den Pflanzenbeständen. Ein geringeres Zellvolumen und die Verminderung der Dichte der Interzellularen verringern die Reflexion im nahen Infrarot durch Änderung der Lichtbrechung und -streuung innerhalb des Blattes (Buschmann & Nagel, 1992). Eine Verminderung der Interzellulardichte tritt bei Geweberissen, Nekrosen oder in Folge von Austrocknung bzw. Wassermangel auf (Fuchs 2003). Gausman et al. (1970) bringen die nahe Infrarot-Reflexion mit dem Volumen der Hohlräume (Interzellularen) im Mesophyll in Verbindung. Kumar et al. (2001) beschreiben den Durchgang des Lichtes durch die Pflanze in Abhängigkeit zur Verteilung der Interzellularen sowie der Anordnung, Größe und Gestalt der Zellen. Kompakte Mesophyllebenen besitzen weniger Lufträume als schwammige Schichten und streuen die Strahlung geringer. Die interne Reflexion wird durch den Brechungsindexwechsel von Luft ($n = 1$) zu Wasser ($n = 1,3$) besonders in den interzellulären Zwischenräumen begünstigt (Thiessen 2002). Jacobsen et al. (1995) bezeichnen den hohen Kontrast des Brechungsindex zwischen wasserreichen Zellkompartimenten und den interzellulären Lufträumen als Grund für die effektive Streuung des Lichtes bei Pflanzen.

Ein anderer Faktor für das spektrale Verhalten im nIR ist die Stapelung mehrerer Blätter. Sie ergibt eine deutliche Zunahme der Reflexion (Mehrfachreflexion), während Blatt- oder Nadelverluste zu einer Abnahme der Reflexion im nahen Infrarot führen

(Landauer & Voß 1989). Durch diesen von Belward (1991) und Hoffer (1978) verwendeten Begriff des additiven Effekts von multiplen Blattebenen lassen sich die in der Arbeit verwendeten Objektklassen spektral gut unterscheiden. Ein Teil der transmittierten Strahlung wird von der nächsten Blattebene reflektiert und erhöht die Gesamtreflexion gegenüber Einzelblättern. Ein höherer Wassergehalt und somit weniger Lufträume senken die Reflexion. Auf Grund anatomischer Unterschiede im Nadel- bzw. Blattaufbau gibt es deutliche Unterschiede in der nahinfraroten Rückstrahlung. Laubbäume reflektieren im nahen Infrarot deutlich höher als Nadelbäume.

Die Trockenrasen weisen im nIR kein typisches Reflexionsplateau auf, sondern zeigen einen allmählichen Anstieg bis 1,3 μm der Signaturkurve und dann einen geringen Abfall bis 2 μm , d. h. es fehlen die typischen Pigment- und Wasser-Reflexionsminimas von Gehölzvegetation. Im Bereich des mittleren Infrarots (1,3 – 2,6 μm) fällt die Reflexion stark ab. Dabei wird der Grad der Reflexion vor allem durch den Wassergehalt in der Pflanze und den Wasserabsorptionsbanden um 1,45, 1,95 und 2,7 μm bestimmt. Je höher der Wassergehalt, desto tiefer liegen die Reflexionswerte (Feldwisch et al. 2001). Neben dem Wasser absorbieren noch biochemische Inhaltsstoffe die Strahlung, u. a. Lignin, Zellulose, Stärke, Eiweiße und Stickstoff. Ihre Absorptionsfähigkeiten sind nicht sehr stark und werden bei gesunden Blättern vom Wasser maskiert (Kumar et al. 2001).

1.3.5 Spektrales Verhalten von Pflanzen unter Schwermetall-Stress

Bereits HORLER et al. (1983) untersuchten die Effekte von Schwermetallen auf die Reflexion von Pflanzen unter Feld- und Laborbedingungen. Es ist bekannt, dass Vegetation bei geochemischem Stress ihr Reflexionsspektrum verändert (Horler, et al., 1983; Singhroy, et al., 1991; Singhroy, et al., 1986; Curtiss, et al., 1991; Clevers, et al., 2004). Durch die physiologischen Störungen treten Modifikationen im Bereich der Grün-Reflexion bei 550 nm oder im Bereich der Chlorophyllabsorption nahe 670 nm auf (Arkimaa, 2002). Ebenso zeigen sich feine Variationen im Anstieg und der Position des Red-Edge zwischen 680 nm und 740 nm durch geochemischen Stress. Die Verschiebungen (*shifts*) sind sowohl zu längeren als auch zu kürzeren Wellenlängen sehr gering (Horler, et al., 1983; Rock, et al., 1988). Außerdem können Veränderungen an der Schulter des nahen Infrarots zwischen 750 nm und 1100 nm auftreten. In Abhängigkeit von Region, Pflanzenart und Methode zeigten sich verschiedene Ergebnisse bei Untersuchungen von Effekten an schwermetallbelasteten Pflanzen. Es werden hier exemplarisch Beispiele für Bergbau-, Industrie- und geochemische Kontaminationen an Pflanzenarten des Wald- und Graslands vorgestellt. Im Gebiet der finnischen Mine Pyhäsalmi ist eine negative Korrelation zwischen der Reflexion der Fichtennadeln, der Entfernung von der Mine und den Schwermetallgehalten (Cu, Zn, Fe, Pb, As) festzustellen. Während die Reflexion im nahen Infrarot (NIR) bei den höchsten Gehalten im Umkreis von 0,5 km absinkt, steigt sie im Bereich von 670 nm. Der so genannte „*blue shift*“ des *Red-Edge-Inflection-Points* (REIP) wurde mit Hilfe der Methode von BARET & GUYOT (1991) in den meisten Testgebieten ermittelt (Arkimaa, 2002). In Testgebieten im Kanadischen Schild wurden Untersuchungen von SINGHROY & KRUSE 1991 durchgeführt. Die verschieden hohen geogenen Belastungen mit Schwermetallen wiesen eine Veränderung im Spektralsignal bei 670 nm auf. Mit Hilfe der *Continuum-Removal*-Funktion wurden die Spektren normiert. Es zeigte sich eine geringe Bandtiefe um 670 nm bei einer Abnahme des Chlorophyllgehalts. An einer ehemaligen Mine (Pb, Zn) im Nordwesten Ungarns wurden vergleichende Analysen zwischen spektralen Messungen und den Schwermetall- und Chlorophyllkonzentrationen vorgenommen. Dabei erwies sich die untersuchte Spezies Schilfrohr als sehr schwermetall-tolerant. Zwar ergab sich eine negative Korrelation zwischen dem Chlorophyllgehalt und dem Bereich um 670 nm, die geringe Signifikanz zwischen Schwermetall- und Chlorophyllgehalt bestätigt aber die große Anpassungsfähigkeit der *Phragmites australis* (Hyde Hecker, 2003). SINGHROY & KRUSE (1991) ermittelten Variationen in der Tiefe und Breite der Chlorophyllabsorption bei 670 nm bei metall-gestresster Gehölzvegetation (u.a. Rot-Eiche, Amerikanische Espe). Sie zeigten an Untersuchungen in einer geogen belasteten Region in Ontario, Kanada eine hohe Korrelation zwischen der REP und der Bandtiefe bei 670 nm und dem Chlorophyllgehalt. Bei dieser Wellenlänge steigt die Reflexion mit dem einhergehenden Chlorophyllverlust an. Das Ziel des Projekts von DUNAGAN et al. (2007) war die Analyse von Quecksilbergehalten in Pflanzen und Böden in einem ehemaligen Industriegebiet im Westen von Connecticut. Verschiedenste Vegetationsindizes und die Bestimmung der REP dienten der Analyse und zeigten hohe Korrelationen zu den Schwermetallkonzentrationen. An Experimenten mit Spinatpflanzen war eine Beziehung zwischen der Quecksilberkonzentration im Boden und im Organismus zu beobachten. Die spektralen Effekte des Hg auf die Pflanzen wurden mit Hilfe von Vegetationsindizes quantifiziert (Dunagan, et al., 2007). Flechten sind gute Akkumulatoren von Schadstoffen. GARTY et al. (2001) konnten bei *Ramalina lacera* in der Industrieregion Haifa eine hohe Korrelation des NDVI zu der Photosyntheserate, dem Chlorophyllgehalt und Kaliumgehalt ermitteln. Für Ba, Cr, Cu und Ni zeigten sich negative Korrelationen zum Index. Die Belastung

wurde insbesondere durch Stahlschmelzen verursacht. Ein Gefäßversuch mit Reispflanzen von REN et al. (2008) zeigte eine signifikante Korrelation zwischen dem Anstieg der Reflexion im VNIR durch die Abnahme des Chlorophyllgehalt durch die erhöhte Pb-Konzentration. Hierbei wurden die *Red-Edge-Position*, die *Shift*-Distanz und Absorptionstiefe erfolgreich angewendet. Auch bei tropischen Pflanzen in Puerto Rico konnte eine Reduktion der Reflexionshöhe bei 550 nm und ein *Red Shift* zu längeren Wellenlängen ermittelt werden. Die Ursache des Pflanzenstresses und des spektralen Verhaltens liegen in der Co-Kontamination der dortigen Böden (Schellekens, et al., 2005). Die signifikanten Korrelationen zwischen den Reflexionsmerkmalen und physiologischen Parametern bei Untersuchungen von Rosso et al. (2005) an Feuchtgebietspflanzen zeigen die Eignung von Fernerkundungsmethoden zur Typisierung von Schadstoffbelastungen (Cd). Mit Hilfe von neuen Klassifikationsalgorithmen (*Support vector classification*) wurden von Wilson et al. (2004) metall-kontaminierte Salzpflanzen eingestuft. Diese Methoden sind für eine Übertragung auf hyperspektrale Fernerkundungsdaten geeignet. Die vorhergehend genannten Autoren nutzten zur Umsetzung ihrer Vorhaben labor- und feldspektrometrische Messungen, andere verwendeten dagegen abbildende Spektrometer (HyMap, CASI, AVIRIS). Diese tasten kontinuierlich spektrale Signaturen im Bereich von 400 bis 1000 nm (CASI) oder 400 bis 2500 nm (HyMap, AVIRIS) ab. Bisher werden die meisten abbildenden Spektrometer von Flugzeugen aus eingesetzt. Um bergbaubedingte Veränderungen in einem Gebiet von 110 km² erfassen zu können, nutzten FISCHER (2002), FISCHER et al. (2003) HyMap-Daten für das dynamische System „Senkung-Grundwasser-Vegetation“. Dabei wurden in den Reflexionsspektren der Gehölzspezies Stresserscheinungen (bei 670 nm) festgestellt, die aufgrund der geomorphologischen und der hydrologischen Situation auftraten. Eine Zinnfabrik im Nordosten Belgiens war das Testgebiet von REUSEN et al. (2003). Durch die CASI-Befliegung im August 2000 standen hochauflösende Fernerkundungsdaten zur Vegetationsanalyse von drei Baumarten (Kiefer, Eiche, Birke) bereit. Nach der *Spectral Angle Mapper Classification* (SAM) wurde innerhalb der erstellten Kiefern-Maske mit Hilfe des Edge-Green First Derivative Normalized Difference (EFGN) Vegetationsstress im Bereich der Fabrik detektiert. Im dem deutschen Kohlebergbauggebiet Kirchheller Heide zeigten sich bei Untersuchungen von BRUNN et al. (2003) Setzungsbewegungen im Gebiet und somit eine Veränderung der hydrologischen Bedingungen. Mit Hilfe von HyMap-Daten konnte geochemischer Stress der Vegetation in diesem Bereich ermittelt werden. Im MINEO-Projekt „*Assessing and monitoring the environmental impact of mining activities in Europe using most advanced earth observation techniques*“ wurden noch weitere Bergbaugeprägte Gebiete untersucht. Durch die toxischen Verhältnisse für die Vegetation im österreichischen Gebiet „Steirischer Erzberg“ zeigten sich pflanzenphysiologische Veränderungen. Der NDVI und die Red Edge Index konnten durch CHEVREL et al. (2002) erfolgreich getestet werden. Die verschiedenen Zielstellungen des Forschungsvorhabens erfordern vielfältige Methoden im Bereich der Auswertung von Spektrometerdaten mittels Vegetationsindizes (Kancheva, et al., 2005; Kancheva, et al., 2003) Klassifikationsalgorithmen (Wilson, et al., 2004) und Funktionsanalysen (Bammel, et al., 1994; Winkelmann, 2005). Wenige Arbeiten zur spektralen Analyse schwermetallbeeinflusster Pflanzen erfolgten im Bereich der Aue. Dort untersuchten CLEVERS et al. (2004), CLEVERS & KOOISTRA (2003) am Fluss Waal in den Niederlanden u.a. Rispengräser. Sie verwiesen auf die eindeutig höhere Rotreflexion von Beständen in Senkenbereichen mit hohen Schwermetallgehalten. Die erhöhte NIR-Reflexion zeigte aber auch die hohe Vitalität der Bestände, da diese einen besseren Bodenwasserhaushalt und mehr organische Substanz aufwiesen. Auch hier verschob sich die REP bei höherer Pb-Konzentration in Richtung der kürzeren Wellenlängen. Ebenso prüfte

KOOISTRA et al. (2003), KOOISTRA et al. (2004), KOOISTRA (2004) die Wirkung von Schwermetall auf die Flutrasenbestände in den Niederlanden. Mit dem Difference Vegetation Index (DVI), der Bestimmung der REP und der PLS-Klassifikation ließen sich hohe Korrelationen zwischen der Reflexion der Pflanzen und den Schwermetallkonzentrationen feststellen. Weitere Arbeiten in der Flussaue im Bereich des Flussmanagements wurden von Epema et al. (2003), Suarez et al. (2007), Suarez (2006) und Schaepman (2007) durchgeführt. In vielen Untersuchungen wurde die Wirkung von Kontaminationen auf Pflanzen nachgewiesen. Es gibt aber im Bereich der Detektion von Schwermetallstress kein Standardinstrumentarium, da sich viele Faktoren im Gelände überlagern und eine eindeutige Zuordnung des Stressors nicht möglich ist. Die Übertragbarkeit der Methoden auf die Auenvegetation ist daher zu testen, weiter zu entwickeln und ein robustes Verfahren für die flächenhafte Ausweisung von schwermetallkontaminierten Flächen abzuleiten.

1.3.6 Methoden der Fernerkundung zur Stressdetektion

Die Methoden der Fernerkundung können durch arithmetische Kombinationen von Kanälen, durch die Differenzierung der Spektralkurven und durch die Kontinuumsfunktion bestimmter Absorptionsminima einen Pflanzenparameter indirekt bestimmen. Zu den einfacheren Verfahren gehört die Kombination zweier oder mehrerer Wellenlängenbereiche. Diese Vegetationsindizes beschreiben verschiedene Objekteigenschaften wie Vitalität, Biomasse, Pigmentgehalt, Blattwassergehalt u.a. Pflanzeninhaltsstoffe. Durch die Methoden entstehen dimensionslose Indexwerte, die verschiedene Störgrößen (Atmosphäre, Sensor, Schatten, Bodenanteil) unterdrücken und so den Informationsgehalt der Spektren erhöhen. SIMS & GAMON (2002) unterscheiden drei primäre Indizetypen. Ein *Simple Ratio* Index (SR) teilt die Reflexionswerte einer Referenzwellenlänge durch eine Indexwellenlänge, obgleich auch die Umkehrung dieser Beziehung möglich ist. Die Werte des *Normalized Difference* Indizes (ND) werden durch die Division der Reflexionssummen der gleichen zwei Wellenlängen normalisiert.

Formel 1.1: Formel zur Bestimmung eines Simple Ratios.

$$SR_{Index} = \frac{R_{Ref}}{R_{Index}}$$

Formel 1.2: Formel zur Bestimmung eines Normalized Difference Index.

$$NDIndex = \frac{R_{Ref} - R_{Index}}{R_{Ref} + R_{Index}}$$

SR = Simple Ratio

ND = Normalized Difference

RRef = Referenzwellenlänge

RIndex = Indexwellenlänge

Red-Edge-Indizes verwenden Reflexionswerte von Wellenlängen zwischen dem Übergang vom stark absorbierenden Rotbereich und der hohen Rückstrahlung im nahen Infrarot. Die Tabelle 1.4 zeigt verschiedene Vegetationsindizes und die in der Literatur untersuchten abhängigen Pflanzenparameter. Mit den am häufigsten verwendeten „*broad band indices*“ *Simple Ratio* (SR) und *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) lässt sich die Vitalität bzw. Biomasse der Pflanzenbestände ermitteln. Die Werte des SR und NDVI werden durch

die Kombination der Reflexion im NIR und Rot ermittelt. Hierbei wurden oft die breitbandigen Landsat und SPOT verwendet. Die Entwicklung der Fernerkundungstechnologie von multispektralen zu hyperspektralen („narrowband“) flugzeug- oder satellitengestützten Sensoren und Spektrometern forcierte die Entstehung von neuen Indizes. Diese können spezifischere biophysische und biochemische Pflanzenparameter bestimmen. Am empfindlichsten auf Veränderungen reagiert der Pigmentgehalt bzw. deren Verteilung im Blatt, so dass bei Stresseinwirkungen Probleme beim optimalen Ablauf der Photosynthese entstehen. Der absolute Gehalt und die Konzentration von Pigmenten diktiert das photosynthetische Potenzial des Blattes und zeigt eine starke Verbundenheit zum physiologischen Status der Pflanze, d. h. zu den Lebensvorgängen wie Photosynthese. Der größte Teil der Strahlung wird vom Chlorophyll a (Chl a) und b (Chl b) absorbiert, um für die Reaktionen der Photosynthese Energie bereitzustellen. Zum anderen gibt es die Karotinoide (Cars), welche die Reaktionszentren vor übermäßigem Licht schützen und dem Chl a helfen, zusätzliche Strahlung einzufangen (Blackburn, 1998). Die Vegetationsindizes (VI) zur Pigmentabschätzung bestimmen entweder den Gehalt eines einzelnen oder das Verhältnis von mehreren Pigmenten. Die Chlorophyllbestimmung durch den Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), den Ratio-Vegetation Index (RVI) u. a. gehen auf das Verhältnis zwischen hoher Reflexion im NIR (um 800 nm) und der Absorption im Rot (um 680 nm) zurück. DATT (1999) beschreibt, dass diese VIs empirisch durch Korrelationen und Regressionen zwischen der Blattreflexion und dem Chlorophyllgehalt abgeleitet wurden. Sie zeigen das Pigment als Indikator für die Vitalität und Biomasse der Pflanzen (Horler, et al., 1983). Da es schwerer ist, den Karotinoid- als den Chlorophyllgehalt abzuschätzen, weil die Blattpigmente in den gleichen Regionen des Lichtes wirken, stellen Photochemical Reflectance Index (PRI), Plant Senescence (PSRI) und Structure Intensive Pigment Index (SIPI) das Verhältnis von Karotinoiden und Chlorophyll dar. Meist wirken sie im Bereich der Reflexion von 400-500 nm (Karotinoid-Absorptionspeak) und dem Rotbereich, wo nur Chlorophyll wirkt. Der PRI benutzt Wellenlängen (531 und 570 nm) beiderseitig des Grünen „Peaks“ (550 nm) und vergleicht somit auch die beiden Pigmente (Sims, et al., 2002). Royo et al. (2003) zeigt, dass verschiedene Vegetationsindizes - darunter PRI und SIPI - hilfreich für die Bestimmung von Genotypen bei Pflanzenzuchtprogrammen sein können, da sie sensibel auf Ertragsvariationen reagieren. Anhand von Reflexionsmessungen an 53 Spezies verglichen SIMS & GAMON (2002) die Chlorophyll- und die Karotinoidgehalte. Nur der PRI steht in einer Beziehung zum Pigmentratio (Cars/Chl) in allen Spezies, dagegen zeigten der SIPI und PSRI keine Korrelationen. Diese Zusammenhänge bedingen noch weiterer Forschung, um die Nutzung der Indizes zu verifizieren. Ein anderer Index, der NPCI analysiert ebenfalls ein Pigmentratio (Gesamtpigment/Chl) und ist wie der PSRI ein guter Indikator für Pflanzenstress (Riedell, et al., 1999). Die pigmentidentifizierenden Indizes stellen einen Großteil am gesamten Spektrum der Methoden dar, da die Zielstellung u. a. die Identifikation von Vegetationsstress beinhaltet und sie empfindlich auf diese Einflüsse reagieren.

Der Wasserstatus bzw. Wassergehalt in der Pflanze/im Blatt ist in der vorliegenden Arbeit von großer Relevanz, da dieser bei Feldmessungen eine Überlagerung mit anderen Stressarten wie Schwermetallkontamination verursachen kann. PENUELAS et al. (1997) beschreiben die Messungen der *Plant Water Concentration* (PWC) als wichtig für die Dürreabschätzung in natürlichen Systemen und der Definition von Waldbrandrisiken. Die Methoden für die Detektion von Wasserstress beruhen auf der Pflanzenphysiologie (Hunt, et al., 1989). Analysen mit Wasserindizes erfolgen in der Nähe der typischen Bereiche, die durch das Wasser bestimmt werden. Die breiten Wasserbanden liegen im mIR bei 1,45, 1,95

und 2,7 μm (Kumar, et al., 2001). GAO (1996) verwendet zwei Kanäle im nIR (0,86 und 1,24 μm) für den NDWI, die sich auf dem hoch reflektierenden Plateau befinden, so dass dieselben Streuungseigenschaften der Vegetation für beide erwartet werden können. Sie zeigen ebenfalls sensible Eigenschaften bei Blattwassergehaltsveränderungen, da sie in der Nähe von schmaleren Wasserbanden (0,98 und 1,2 μm) lokalisiert sind. Auch der WBI verwendet eine Referenzwellenlänge (R970) im Bereich der schwachen Absorption von Wasser bei 0,97 μm und zeigt eine hohe Korrelation mit dem PWC, wie PENUÉLAS et al. (1997) an mediterranen Spezies testete. Dagegen spricht die These von CECCATO et al. (2001), dass die Proportionalität zwischen Vegetationsstatus und Wassergehalt nicht für alle Spezies gilt. LOBELL & ASNER (2003) untersuchten in Mexiko Anbaupflanzen mit Hilfe von Wasserindizes (WBI, NDWI, MSI, NDVI) auf Stress. Insgesamt zeigten sie alle eine Abhängigkeit bei Stresserscheinungen. Nach der *Three-Channel-Ratio-Technik* von GAO et al. (1993) wurden von Pu et al. (2003) die *three-band ratio indices* definiert. Diese reduzieren effektiv die lineare Reflexion des Untergrundes und zeigen eine gute Korrelation zum *Relative Water Content* (RWC).

Die vegetationstypische Eigenschaft des Red-Edge beruht auf der Lokalisierung zwischen der Depression im roten Licht und dem nIR-Plateau (Filella, et al., 1994; Munden, et al., 1994). Entscheidend für die Wissenschaft ist der Wendepunkt (*Red-Edge Inflection Point*) zwischen der konkaven unteren und der konvexen oberen Red-Edge-Kurve (Merton, 1998). Oberhalb des Mittelpunktes verändert sich bei Stress die Geometrie der Kurve. Der Red-Edge Vegetation Stress Index (RVSI), beschrieben von MERTON (1998), basiert auf diesen davor aufgezeigten Veränderungen mit dem Resultat positiver Indexwerte bei hohem Stress. Der Autor testete den Index an 7 Pflanzengesellschaften, darunter auch Extremstandorte (hohe Salz- oder SerpentinKonzentrationen). STANFORD et al. (2003) untersuchten mit verschiedenen Indizes ein Krankheitsbild bei Nadelbäumen, der so genannten Dothistroma-Kieferschütte und es zeigte sich, dass der RVSI diese Schäden ausmachen konnte.

Ebenso sind mit den hyperspektralen Indizes die blattchemischen Inhaltsstoffe wie Stickstoff (Johnson, et al., 1996; Martin, et al., 1997; Yoder, et al., 1995), Lignin (Serrano, et al., 2002; Matson, et al., 1994) und Cellulose (Daughtry, et al., 1996) detektierbar. Der Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI) ist ein Index für die Bestimmung des relativen Stickstoffgehalts. Dabei ist die Wellenlänge bei 1510 nm sensibel auf N-Veränderungen in der Biomasse (Mobasheri, et al., 2007). Der CAI untersucht den Cellulosegehalt bei Pflanzen. Dieser absorbiert in der Region um 2000 und 2200 nm. Von Daughtry et al. (2005) wurde der Lignin Cellulose Absorption Index (LCA) entwickelt, der ebenso wie der Normalized Difference Lignin Index (NDLI) den Ligningehalt bestimmt. SERRANO et al. (2002) untersuchten, ob der Stickstoff- und Ligningehalt der mediterranen Chaparral-Vegetation mit AVIRIS-Daten bestimmt werden kann. Mit Hilfe der logarithmisierten Indizes NDNI und NDLI konnten die relevanten Parameter in der buschigen Vegetation ermittelt werden. Für die Bestimmung von Blattchemischen Parametern wurden Streuproben genommen für die Grundlage eines Ökosystemproduktivitätsmodells. Mit Hilfe von AVIRIS-Daten zeigten MARTIN & ABER (1997), dass durch den ersten Spektralkanal der Stickstoff- und Ligningehalt bestimmt werden kann.

Tabelle 1.4: Methodenübersicht aus der Literatur mit zugehöriger Referenz und bestimmendem Parameter.

Methoden	Referenz	Parameter
Anthocyanin Content Index (ACI)	(Gamon, et al., 1999)	Anthocyanin
Anthocyanin reflectance index (ARI)	(Gitelson, et al., 2001)	Anthocyanin
Carter Index 1 (Ctr1)	(Carter, 1994)	Chlorophyll
Carter Index 2 (Ctr2)	(Carter, et al., 1996)	Chlorophyll
Cellulose Absorption Index (CAI)	(Daughtry, et al., 1996)	Cellulose
Disease Water Stress Index 5 (DWSI-5)	(Apan, et al., 2004)	Blattwasser
Edge-green first derivative normalized difference (EGFN)	(Penuelas, et al., 1993)	Physiologischer Status
Green-green first derivative normalized difference (GGFN)	(Penuelas, et al., 1993)	Physiologischer Status
Leaf Chlorophyll Index (LCI)	(Datt, 1999)	Chlorophyll
Lignin Cellulose Absorption Index (LCA)	(Daughtry, et al., 2005)	Lignin, Cellulose
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI)	(Daughtry, et al., 2000)	Chlorophyll
Modified Normalized difference index (mND705)	(Sims, et al., 2002)	Chlorophyll
Moisture Stress Index (MSI)	(Hunt, et al., 1989)	Blattwasser
Normalized Difference Infrared Index (NDII)	(Hardinsky, et al., 1983)	Blattwasser
Normalized Difference Lignin Index (NDLI)	(Serrano, et al., 2002)	Lignin
Normalized Difference Moisture Index (NDMI)	(Wilson, et al., 2002)	Blattwasser
Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI)	(Serrano, et al., 2002)	Stickstoff
Normalized Difference Pigment Index (NDPI)	(Penuelas, et al., 1995)	Ratio Karotinoide/ Chlorophyll a
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	(Rouse, et al., 1974)	Vitalität, Biomasse
Normalized Difference Water Index (NDWI)	(Gao, 1996)	Blattwasser
Normalized Phaeophytinization Index (NPQI)	(Barnes, et al., 1992)	Chlorophylldegradation
Normalized Pigment Chlorophyll Index (NPCI)	(Penuelas, et al., 1994)	Ratio Gesamtpigment/ Chlorophyll a
Photochemical Reflectance Index (PRI)	(Gamon, et al., 1992)	Lichtausnutzungseffizienz
Pigment-specific Normalised Difference Index PSNDc	(Blackburn, 1998)	Karotinoide
Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)	(Merzlyak, et al., 1999)	Ratio Karotinoide/ Chlorophyll a
Ratio Vegetation Index (RVI)	(Jordan, 1969)	Vitalität, Biomasse
Red-edge Vegetation Stress Index (RVSI)	(Merton, 1998)	Red-Edge
Red-Edge-Position (1. Derivation)	(Horler, et al., 1983)	Red-Edge-Position
Red-Edge-Position (lineares Model)	(Guyot, et al., 1988)	Red-Edge-Position
Simple Ratio Pigment Index (SRPI)	(Penuelas, et al., 1995)	Karotinoide
Structurally independent xanthophyll index (SIXI)	(Penuelas, et al., 1995)	Xanthophyll
Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)	(Penuelas, et al., 1995)	Ratio Karotinoide/ Chlorophyll a
Water Band Index (WBI)	(Penuelas, et al., 1993)	Blattwasser

Da der Bereich des starken Reflexionsanstiegs von Rot zu Infrarot (680 – 740 nm) nachweislich ein Indikator für Pflanzenstress ist, wird er in zahlreichen Analysen anderer Autoren untersucht (Collins, 1978; Baranoski, et al., 2005; Clevers, et al., 2002). Insbesondere der Hauptwendepunkt (REP), der maximalen Steigung in diesem Bereich, zeigt Verschiebungen (*shifts*) bei exogenen Einwirkungen (Horler, et al., 1983; Pinar, et al., 1996). Die Verschiebungen sind sowohl zu längeren (red shift) als auch zu kürzeren (blue shift) Wellenlängen sehr gering (Horler, et al., 1983; Rock, et al., 1988). Um den Rot-Infrarot-Anstieg zu parametrisieren stehen verschiedene Methoden zur Berechnung der REP zur Verfügung. Durch die erste Ableitung der Funktionskurve wird die maximale Steigung bestimmt (Curran, et al., 1995) (Formel 1.3). Dieses Verfahren setzt eine hohe Anzahl von Wellenlängenkanälen voraus (BACH 1995). Ebenso wie die vorher beschriebene Methode benötigt die so genannte inverse Gauß-Fit-Funktionsanpassung von BONHAM-CARTER (1988)

eine hohe Stützstellendichte. Dabei wird dem Verlauf der Reflexionskurve eine Gaußsche Normalverteilung angepasst (gefittet) (Miller, et al., 1990). Zwei einfachere Verfahren sind die Linearisierung von BARET & GUYOT (1991) (Formel 1.4, Formel 1.5) und die Lagrange Interpolation von DAWSON & CURRAN (1998). Die erstere benötigt nur vier Reflexionswerte von Wellenlängen im Rot-Infrarot-Anstieg zur Berechnung der REP. Hier wird angenommen, dass der Verlauf des Anstiegs eine lineare Funktion ist. Die letztere beruht auf einer Drei-Punkt-Interpolation der Wellenlängenkanäle zur Berechnung der ersten Ableitung und einer anschließenden Polynomannpassung 2. Grades. Durch diese vorangestellten Methoden wird die Spektralkurve parametrisiert. Die Red-Edge-Position korreliert stark mit dem Chlorophyllgehalt, der ein Indikator für Stress oder Seneszenz ist (Gitelson, et al., 1996). Bei sinkendem Chlorophyllgehalt durch z.B. Stresseinwirkung kommt es zu einer Verschiebung zu kürzeren Wellenlängen (Jago, et al., 1999). Ein Problem bei der Derivation ist die Identifikation von 2 Peaks in dieser Region bei 700 nm und 725 nm, so dass der Red Edge Shift zwischen den beiden Punkten springt (Horler, et al., 1983; Clevers, et al., 2002). Hierbei zeigt sich der erste Peak als sensitive auf Veränderungen des LAI (Pu, et al., 2003; Lamb, et al., 2002). Ebenso stehen andere Pflanzenparameter wie Stickstoff (Lamb, et al., 2002; Lucas, et al., 2000), Wassergehalt (Liu, et al., 2004) und Biomasse (Filella, et al., 1994) mit der REP in Beziehung.

Formel 1.3: Formel zur Bestimmung der Red-Edge-Position mittels erster Ableitung der Spektralkurve.

$$\lambda_{re} = \lambda_{max} \frac{\Delta R}{\Delta \lambda}$$

Formel 1.4: Formel zur Bestimmung der Red-Edge-Position mittels des linearen Modells von Guyot & Baret. Teil 1

$$R_{re} = \frac{R_{670} + R_{780}}{2}$$

Formel 1.5: Formel zur Bestimmung der Red-Edge-Position mittels des linearen Modells von Guyot & Baret. Teil 2

$$\lambda_{re} = 700 + 40 \frac{(R_{re} - R_{700})}{(R_{740} - R_{700})}$$

R = Reflexion
 λ = Wellenlänge

Bei der Funktionsanalyse wird davon ausgegangen, dass die Reflexionsmessungen eines Objektes an eine kontinuierliche Funktionskurve angepasst werden kann. Wichtige Merkmale einer Signaturkurve sind deren Lage, Tiefe, Ausdehnung (FWHM), Form, Steigung, lokale Minima und Maxima sowie die Hauptwendepunkte. Durch Normierungsverfahren wie die Kontinuumtransformation werden die Messwerte in ein einheitliches Skalenniveau konvertiert, damit ein Vergleich der Spektralkurven miteinander gewährleistet ist (Erasm, 2002). Bei der Ableitung lokaler Extrema werden Minima und Maxima sowie die

Beugungswellenlänge für die Spektralsignatur berechnet. Der Bereich der maximalen Steigung kann durch differentialanalytische Verfahren (1. Ableitung) bestimmt werden.

Die Kontinuumtransformation (*Continuum Removal* = CR) dividiert die ursprüngliche Reflexionskurve durch eine Verbindungslinie zwischen Anfangs- und Endpunkt eines Ausschnittes des Spektrums (*Convex Hull*) (Formel 1.6, Abbildung 1.7). Im einfachsten Fall ist diese mathematische Funktion eine Gerade zwischen den lokalen Maxima (Clark, et al., 1984; Erasmi, 2002; Montero, et al., 2001). Dabei werden die Eingabedaten auf einen normierten Wertebereich von $0 < CR < 1$ skaliert. Die Einteilung der Kontinuumbereiche bezieht sich auf die Spektrumsabschnitte, in denen lokale Minima auftreten und bei denen Rückschlüsse auf Pflanzeninhaltsstoffe möglich sind. Untersuchungen von NOOMEN et al. (2005), EYERS & MILLS (2002), YANG et al. (2006), MUTANGA et al. (2005), UNDERWOOD et al. (2003), HUANG et al. (2004) zeigten die Eignung der Methode für die Detektion der Effekte von Pflanzenstress. Für die Pflanzeninhaltsstoffe Chlorophyll, Lignin, Stickstoff, Cellulose, Wasser, Protein, Zucker und Stärke haben CURRAN et al. (2001) sowie KOKALY & CLARK (1999) die Methoden erfolgreich getestet. Hierbei zeigen sich die Absorptionsmerkmale der Elemente in der Spektralkurve bei 470, 670, 1200, 1730, 2100 und 2300 nm.

Durch die Normierung lassen sich Tiefe, Lage, FWHM und Steigung bestimmter Kurvenbereiche (z.B. Red-Edge) vergleichen und damit indirekt Pflanzenparameter (Chlorophyllgehalt, Blattwassergehalt) und exogene Stresseinwirkungen (Schwermetalle, Wasser) ermitteln.

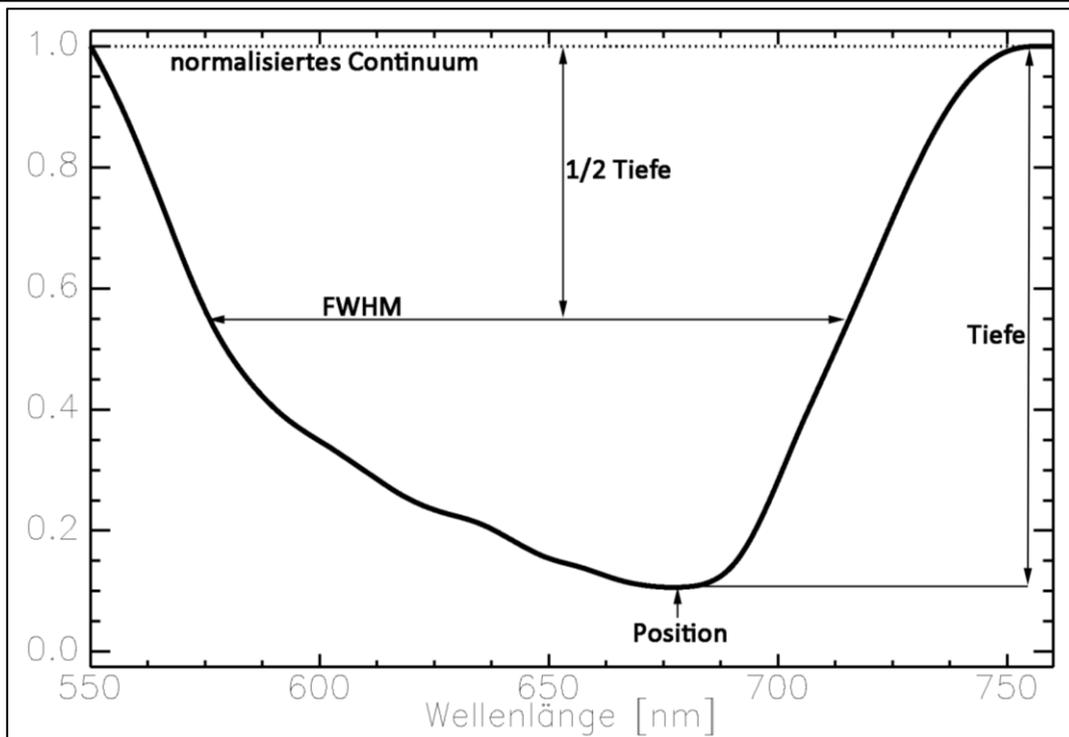
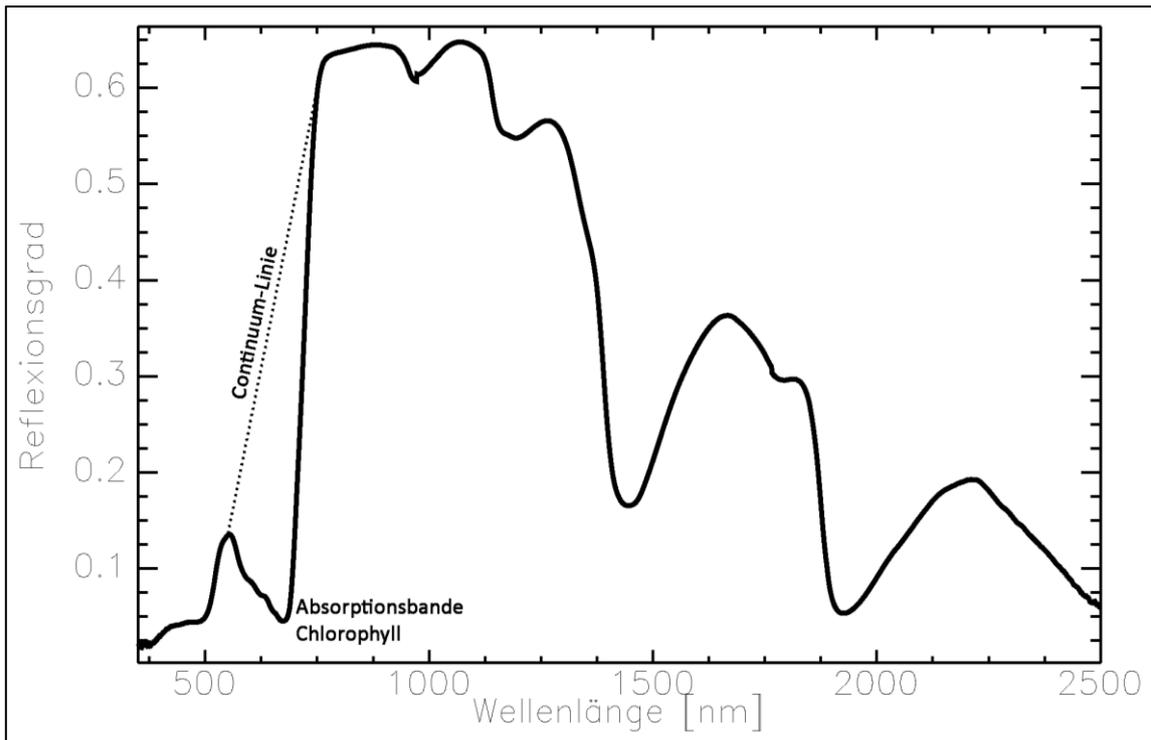


Abbildung 1.7: Beispiel einer *Continuum-Removal*-Funktion im Bereich der Chlorophyllabsorption bei Vegetation (nach speclab.cr.usgs.gov/papers.refl-mrs/refl4.html).

Formel 1.6: *Continuum-Removal*-Funktion eines Reflexionsspektrums.

$$D = R_S / R_C$$

D = Tiefe der Absorptionsbande

RS = Reflexionsspektrum

RC = Reflexion des Continuum (*convex hull*)

2 Untersuchungsgebiet

Die Elbe ist mit ca. 1.000 km Länge und einem 150.000 km² großen Gesamteinzugsgebiet einer der größten Flüsse Mitteleuropas. Durch die chemische Industrie und den jahrhundertelangen Bergbau erfolgten Schadstoffeinträge in die Elbauenböden (Scholz, et al., 2001).

2.1 Auswahl des Untersuchungsgebiets

Die Auswahl der Standorte fiel auf Regionen im rezenten Überflutungsbereich der mittleren Elbe. Dabei sind folgende Kriterien von Bedeutung (Tabelle 2.1):

- bodenkundliche Unterschiede (Bodenform),
- morphologische Unterschiede (Hochfläche, Niederterrasse, Rinne),
- vegetationskundliche Unterschiede (dominierende Pflanzenarten)
- Belastungsgrad des Bodens mit Schwermetallen.

Tabelle 2.1: Kriterien für die Auswahl der Untersuchungsgebiete.

Pflanzenart	Bodenform	Morphologie	Kontaminationsgrad
<i>Große Brennnessel</i> (<i>Urtica dioica</i>)	Tschernitzen aus Auenschluffen	Niederterrasse	Hohe bis kritische Belastung
Gemeiner Beifuß (<i>Artemisia vulgaris</i>)	Tschernitzen aus Auenschluffen	Niederterrasse	Hohe bis kritische Belastung
Rohrglanzgras (<i>Phalaris arundinacea</i>)	Tschernitzen aus Auenschluffen	Niederterrasse	Hohe bis kritische Belastung
Wiesenfuchsschwanz (<i>Alopecurus pratensis</i>)	Vegen aus Auenlehm	Hochfläche	Geringe bis mittlere Belastung
Knickfuchsschwanz (<i>Alopecurus geniculatus</i>)	Gleye aus Auentonschluffen	Rinne	Hohe bis kritische Belastung

Durch die Wahl der Kriterien werden verschiedene Standortbedingungen in der Aue abgedeckt, die einen Einfluss auf die feld- und laborspektrometrischen Messungen haben können. Hierbei werden die Bereiche der Auenvegetation mittels Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung von 2005 für Sachsen und Sachsen-Anhalt (Peterson, et al., 1992) ausgewiesen (Abbildung 2.1). Folgende Objektklassen werden im Weiteren untersucht:

- Artenarmes Intensivgrünland
- Mesophiles Grünland
- Feucht-/Nassgrünland
- Ruderalflur, Staudenflur feucht/nass
- Wirtschaftsgrünland

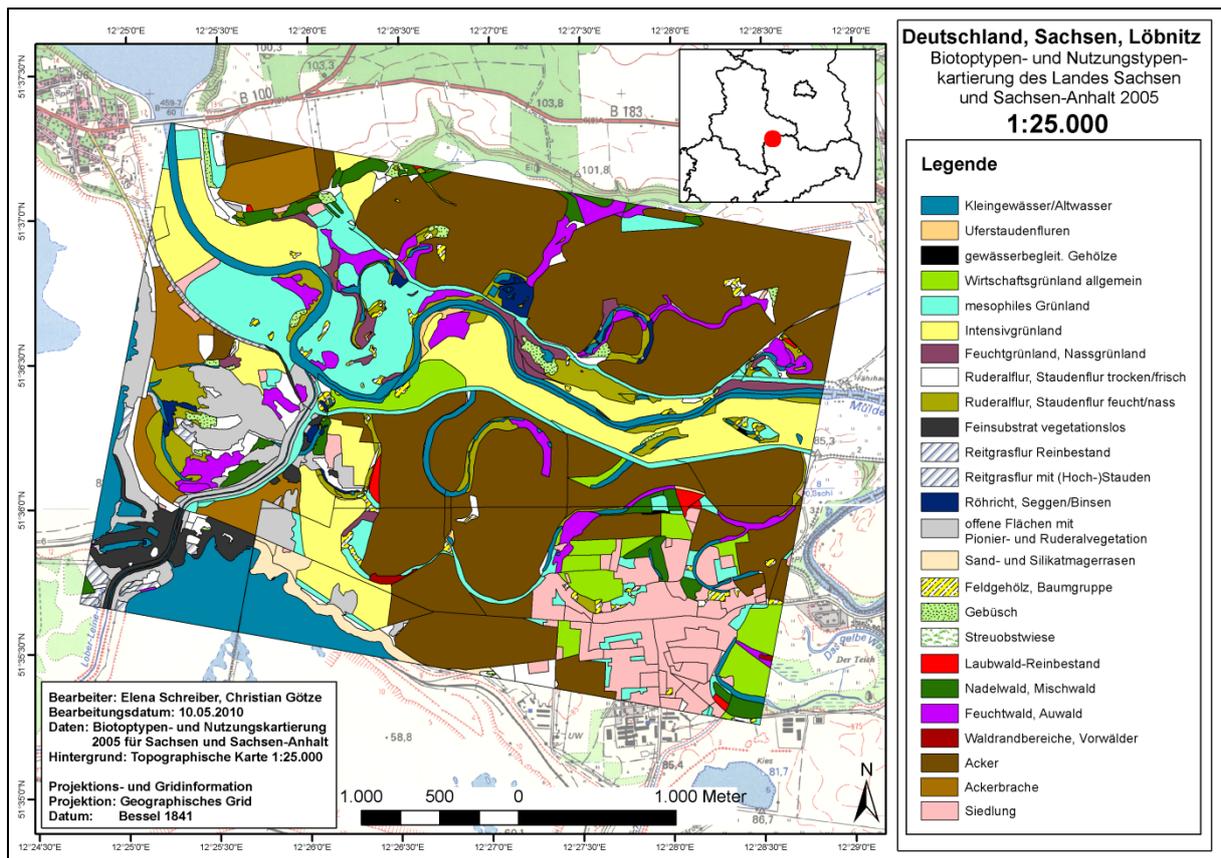


Abbildung 2.1: Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung von 2005 Sachsen-Anhalt und Sachsen für das Untersuchungsgebiet an der Muldeaua.

Es kommen keine Feucht- und Auwaldbereiche sowie angrenzende Ackerflächen in Betracht. Aufgrund von langjährigen Untersuchungen des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) stehen eine Vielzahl an Daten und Ergebnissen zur Verfügung (Rinklebe, et al., 2010; Overesch, et al., 2007). Mit Hilfe dieser Felddaten wurde eine Vorauswahl der Messstandorte durchgeführt. Das vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) geförderte Verbundprojekt RIVA schuf die bodenkundliche Grundlage für die Untersuchungsgebiete „Schleusenheger Wiesen“ bei Wörlitz und „Schöneberger Wiesen“ bei Steckby. Der Standort „Biberwerder“ an der Saale-Elbe-Mündung bei Breitenhagen wird vom Landesamt für Umwelt Sachsen-Anhalt (LAU) und vom Landesamt für Geologie und Bergwesen betreut.

Die Arbeit baut auf Ergebnissen von Vorläuferprojekten des LAU „Gefahrenabschätzung für Grundwasser und Nutzpflanzen bei erhöhten Gehalten von Cadmium, Zink, Kupfer, Chrom, Nickel, Blei, Quecksilber und Arsen in Auenböden der Elbe“ (FKZ 76213/08/01), des BMBF „Übertragung und Weiterentwicklung eines robusten Indikatorensystems für ökologische Veränderungen in Auen (RIVA)“ (FKZ 0339579) und des Projekts „Quantifizierung von Quecksilberdämpfen aus Auenböden der Elbe“ (LAU-FKZ 76213/01/05) auf.

An den Standorten wurden Bodenhydrologische Intensivmessplätze für das Monitoring von Schwermetallen installiert. Im Rahmen der Dissertation von RINKLEBE (2004) wurden Bodenprofile angelegt, detailliert feldbodenkundlich beschrieben und mit laboranalytischen Verfahren charakterisiert. Zur Übertragung der Ergebnisse auf vergleichbare Flussauen wurde die Mulde gewählt. Die Bereiche sind Untersuchungsgebiete des Projektes „Entwicklung eines Schadstoffausbreitungsmodells zur stoffbezogenen Risikoanalyse und -

bewertung extremer Hochwasserereignisse am Beispiel des Landkreises und der Stadt Bitterfeld – SARISK“ im Rahmen der BMBF-Ausschreibung „Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse“ (RIMAX) (FKZ 0330690). Hierbei können auf Karten von kontaminierten Sedimentablagerungen sowie auf ein Digitales Laserscanner- Geländemodell zurückgegriffen werden. Ebenso werden hier die Kriterien und Biotoptypen der Elbaue angewendet.

2.2 Geographische Einordnung

Das Elbegebiet im betrachteten Raum zwischen Muldemündung und Saalemündung gehört zum Elbe-Elster-Tiefland. Die Untersuchungsgebiete befinden sich an der Mittleren Elbe im Bundesland Sachsen-Anhalt. Es handelt sich um Auengrünlandstandorte des Deichvorlandes im rezenten Überflutungsbereich der Elbe (Abbildung 2.2). Das Untersuchungsgebiet A „Schleusenheger Wiesen“ liegt linkselbisch im Gleithangbereich bei Elbekilometer 242/243 in der Nähe von Wörlitz, wenige Kilometer östlich von Dessau zwischen Mündung von Schwarzer Elster und Mulde (Lat = 51°51.693' N/ Lon = 12°23.083' E, WGS 84). Das Untersuchungsgebiet B „Schöneberger Wiesen“ bei Steckby befindet sich rechtselbisch im Gleithangbereich bei Elbekilometer 283/285, zwischen Mulde- und Saalemündung (Lat = 51°54.853' N/ Lon = 12°0.010' E, WGS 84). Wenige Kilometer nordöstlich von Breitenhagen liegt das Untersuchungsgebiet C „Biberwerder“ linkselbisch im Gleithangbereich, etwa bei Stromkilometer 290/292 (Lat = 51°57.060' N/ Lon = 11°55.423' E, WGS 84).

Das Untersuchungsgebiet D der Muldeaue liegen in Sachsen im Bereich des Elbe-Mulde-Tieflands bei Muldekilometer 53/63 zwischen Löbnitz und Pouch (51°36.526' N/ 12°26.606' E). Ebenso handelt es sich um Grünlandstandorte (Overesch, 2002; Rinklebe, et al., 1999). Der Untersuchungsraum liegt im Gebiet des Biosphärenreservats Mittelelbe (BNatSchG, 2002). Ebenso befinden sich in unmittelbarer Nähe die FFH-Gebiete „Muldeaue oberhalb Pouch“, „Dessau-Wörlitzer Elbauen“ und „Elbaue Steckby-Lödderitz“ (FFH-Richtlinie, 1992) (Abbildung Anh. 2).

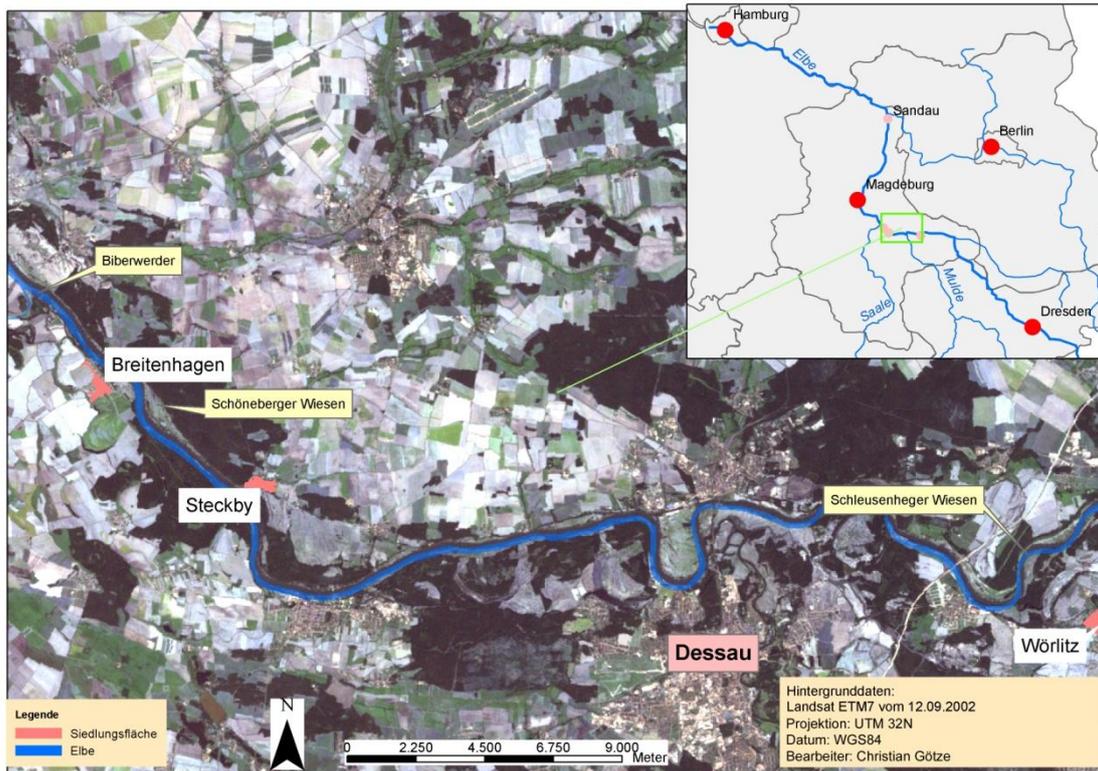


Abbildung 2.2: Untersuchungsgebiete an der mittleren Elbe (Breitenhagen, Steckby und Wörlitz).

2.2 Klima

Alle Untersuchungsgebiete sind klimatisch durch das Ostdeutsche Binnenlandklima geprägt. Die Untersuchungsgebiete Wörlitz, Steckby, Breitenhagen und Löbnitz liegen im Bereich des Mitteldeutschen Trockengebietes, im Regenschatten des Harzes (Liedtke, et al., 2002). Tabelle 2.2 gibt die Jahresmittelwerte von Lufttemperatur und Niederschlag wieder.

Tabelle 2.2: Mittlere Temperatur- und Niederschlagsdaten von 1961-1990 der Untersuchungsgebiete (nach: DWD, 1997-1999).

Untersuchungsgebiet	A	B/C	D
Ort	Wörlitz	Steckby/ Breitenhagen	Löbnitz
mittlere Jahreslufttemperatur [°C]	8,4	8,7	8,8
mittlerer Jahresniederschlag [mm]	570	495	548

2.3 Geologie

Die Geologie der Untersuchungsgebiete ist geprägt durch glazifluviale bzw. fluviale Sedimente des Pleistozäns und des Holozäns. Zwischen 15 und 80 m unter der Geländeoberfläche befindet einen mitteloligozänen Rupelton des Tertiärs. Die Ablagerungen der Elster-, Saale- und Weichselkaltzeit sowie z.T. des Holozäns sind überwiegend kalkfreie Kiese und Sande, die den lokalen Hauptgrundwasserleiter bilden. Im Untersuchungsgebiet B

befindet sich etwa 5 m unter der Geländeoberfläche lokal ein saalekaltzeitlicher Geschiebemergel. Mit dem Ausklingen des Pleistozäns begann die Bildung einer Auenlehmdecke. Diese besteht aus allochtonem Bodenmaterial, welches als Hochflutsediment abgelagert wurde und die sandig-kiesigen Elbtterrassen in einer Mächtigkeit von bis zu 2 m bedeckt (Rinklebe, et al., 1999).

2.4 Hydrologie

Das Wasserregime ist geprägt durch periodische Überschwemmungen der Aue und stark variierenden Grundwasserständen (über 4 m) (Abbildung 2.3). Dabei treten regelmäßig Frühjahrshochwässer infolge einsetzender Schneeschmelze im Gebirge, häufig Winterhochwässer und seltener Sommerhochwässer (durch Starkniederschläge) auf. Die höchsten Pegelstände sind in der Regel in den Monaten März und April zu verzeichnen (Rinklebe, et al., 1999). Das Grundwasser ist zum Hauptvorfluter gerichtet. Dieser steht in direktem hydraulischem Kontakt zum Aquifer.

In den Untersuchungsgebieten ist der Grundwasserflurabstand bei hohen Pegelständen gering, im Sommer kann er tiefer als 5 m unter der Geländeoberfläche liegen. Durch die geringen Niederschlagsmengen des Untersuchungsgebietes und hohen Evaporationsverlusten auf den Grünlandnutzungen ist die Neubildungsrate von Grundwasser gering. In den Senken und Flutrinnen kann das Grundwasser aufgrund der Auentone nicht ungehindert in die hier vorliegenden Böden vordringen. (Altermann, et al., 2001).

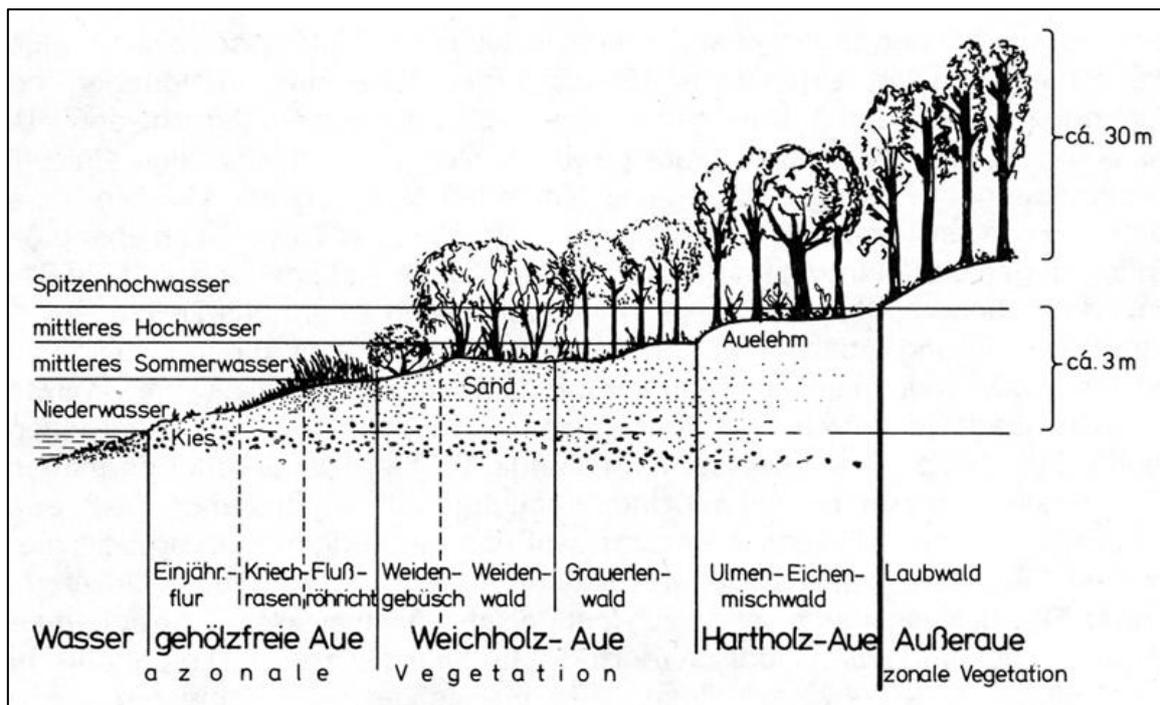


Abbildung 2.3: Schematischer Querschnitt durch die Aue eines Flusses (Brehm, et al., 1990).

2.5 Geländemorphologie und Böden

Die Klasse der Auenböden wird nach KA5 (2005) zu Böden aus Sedimenten in Tälern von Flüssen und Bächen zusammengefasst (Abbildung Anh. 3). Die Bodenbildung wird geprägt durch die periodische Überflutung und Grundwasserschwankungen. Diese Faktoren stehen

in engem Zusammenhang mit der Geländemorphologie und der Verteilung der Bodenformen. Die Elbauen des Untersuchungsraumes zeigen eine ausgebildete, terrassenförmige Struktur. Zur Einordnung der Böden standen die Bodenkarte BK50 von Sachsen-Anhalt, die Bodengefährdungskarte und hochaufgelöst die Bodenformenkarte von Rinklebe et al. (2000) zur Verfügung. Die Auenböden gliedern sich wie folgt (Abbildung 2.4):

- ufernaher Elbbereich: Sapropele aus Organomudden, Ramblen und Paternien bis Gley-Paternien aus Auensand
- unterer Elbterrassen/ Niederterrassen: flächenhaft vergleyte Tschernitzen aus Auenschluff
- höhere Elbterrasse/ Hochflächen: dominieren Vegen aus Auenlehmen
- Randbereiche der Flutrinnen: Bodengesellschaften von Gley-Vegen und Vega-Gleyen aus Auenlehmen
- in den Flutrinnen/ Senken: Gleye aus Auenlehmtönen bis Auenschlufflehmen, stellenweise Pelosol-Gleye und Pseudogley-Gleye aus Auentonen gebildet (Rinklebe, et al., 2000).

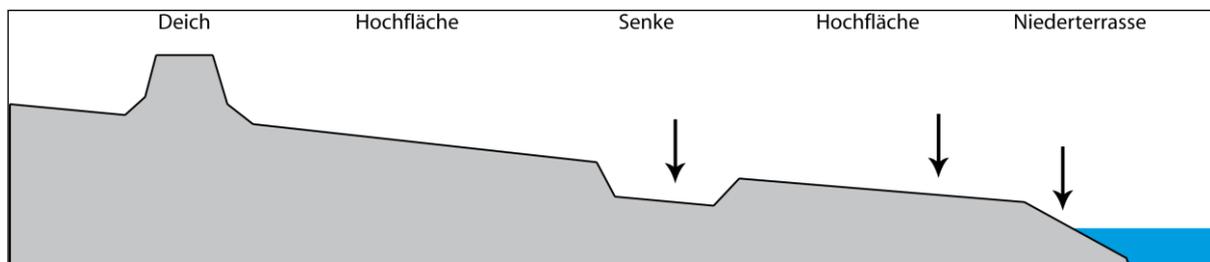


Abbildung 2.4: Geomorphologische Einheiten der Auengebiete (Pfeile = Probenahme- und Messstandorte für die Arbeit).

2.6 Vegetation und Nutzung

Zwischen Mulde- und Saalemündung befinden sich auf 117,4 km² die größten zusammenhängenden Auenwaldbestände Mitteleuropas. Natürliche Baumarten sind die Stieleiche (*Quercus robur*), die Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*) und Ulmen (*Ulmus spec.*) (Feld- und Flatterulme). Die eutrophen Tschernitzen der unteren Elbterrassen werden dominiert durch Brennessel-Staudenfluren (*Urtica dioica*), die weitestgehend dem Brennessel-Seiden-Zaunwinden-Saum (*Cuscuta europaeae-Convulvuletum sepium*) zugeordnet werden können. Die Bestände dieser Gesellschaft sind in Ufernähe oft mit Rohrglanzgrasröhrichten (*Phalaridetum arundinaceae*) verzahnt. Auf den höhergelegenen Vega-Standorten haben sich vorwiegend Wiesenfuchsschwanz-Wiesen (*Galio-Alopecuretum pratensis*) ausgebildet (Abbildung Anh. 4). Die Flutrinnen werden von einem kleinräumigen Mosaik aus Rotfuchsschwanzrasen (*Rumici-Alopecuretum aequalis*), der Knickfuchsschwanz-Gesellschaft (*Ranunculo repentis-Alopecuretum geniculati*) und der Straußgras-Gesellschaft (*Rumici crispi-Agrostietum stoloniferae*) eingenommen (Rinklebe, et al., 2000) (Abbildung 2.3). Das Untersuchungsgebiet A bei Wörlitz und D bei Löbnitz wurde bis 1991 als Rinderweide, seitdem als Mäh-Weide genutzt. Das Untersuchungsgebiet B bei Steckby wurde bis 1995 beweidet. Es steht momentan unter Vertragsnaturschutz und wird bei ein- bis zweischüriger Mahd bewirtschaftet. Das Untersuchungsgebiet C bei Breitenhagen unterliegt keiner Nutzung (Altermann, et al., 2001; Rinklebe, et al., 2001).

2.7 Belastungssituation der Flussaue

Schwermetalle aus anthropogenen Quellen werden bei Hochwasserereignissen in gelöster Form oder adsorbiert an Schwebstoffe mit dem Flusswasser in die Auen eingetragen. Die Sedimentationsbedingungen haben in Flussauen entscheidenden Einfluss auf den Schwermetalleintrag. Der Trockenmasseeintrag durch die Flussschlämme nimmt mit der Entfernung vom Fluss ab (Friese, et al., 2000). In Geländevertiefungen mit langer Überflutungsdauer (Sedimentfallen) werden verstärkt stark kontaminierte Auenschlämme abgelagert. Insgesamt nimmt die Schwermetallbelastung des Oberbodens mit abnehmender Geländehöhe und einhergehend längerer Überflutungsdauer zu (Swaton, 2001). Es lassen sich als Belastungsschwerpunkte in der Flussaue tiefer gelegene Terrassenbereiche in Ufernähe, die besonders oft überflutet werden, und Geländevertiefungen, wie z.B. Flutrinnen, die oft erst weit nach Ende des Hochwassers wieder trocken fallen, herausstellen (Friese, et al., 2000)(Abbildung Anh. 5, Abbildung Anh. 6).

Hinsichtlich der Elbe und ihrer Nebenflüsse ist die industrielle Aktivität von besonderer Rolle. Aufgrund von Erzbergbau, Braunkohletagebau, Metallverhüttung und –bearbeitung gibt es viele Industrie-Altlastenstandorte mit entsprechend hoher Schadstoffbelastung. Daneben finden sich auch zahlreiche lokal bedeutsame Quellen wie Öltanks, Chemikalienlage und Gewerbegebiete (Geller, et al., 2004). Die Schadstoffquellen des Mulde- und Saalesystems zeigt die Tabelle 2.3. Hohe Schwermetallkonzentrationen sind zum Teil geogen bedingt, z.B. die Belastung der Mulde durch die geochemische Provinz des sächsischen Erzgebirges.

Tabelle 2.3: Hauptsächliche Arten von Schadstoffquellen im Mulde- und Saalesystem (Geller, et al., 2004).

Quelle	Hauptbelastung durch
Bergwerke	Metalle, Arsen, Salze
Halden	Metalle, Arsen, Radioaktivität, Salze
Tailings	Metalle, Arsen, Radioaktivität, Salze
Teiche	Metalle, Arsen, Organik, persistente Xenobiotika
Deponien	Metalle, Arsen, Organik, persistente Xenobiotika
Industriebetriebe (-flächen)	Metalle, Arsen, Organik, persistente Xenobiotika
Kontaminierte Flächen (u.a. Auen)	Metalle, Arsen, Organik, persistente Xenobiotika
Kontaminierte Grundwässer	Metalle, Arsen, Organik, persistente Xenobiotika

3. Methoden und Daten

3.1 Gefäßversuch

Die spektralen Kenntnisse im Bereich der Detektion von Schwermetallstress in Pflanzen sind gering. Die Bedingungen im Feld zeigen eine vergesellschaftete Auenvegetation mit einer Vielzahl von Einflussfaktoren auf den physiologischen Zustand. Die Überlagerung von Faktoren können in einem standardisierten Gefäßversuch mit Einzelarten weitestgehend ausgeschlossen und somit das spektrale Verhalten besser beschrieben und interpretiert werden.

Im Gefäßversuch an der Versuchstation in des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) Bad Lauchstädt wurde untersucht, ob sich während der phänologischen Phase der Auenvegetation unter verschiedenen Kontaminationsgraden Schwermetallstress bzw. -schädigungen mittels spektrometrischer Messungen detektieren und parametrisieren lassen. Dabei werden durch standardisierte Bewässerung (60 % der max. Wasserkapazität) und Nährstoffzufuhr (Düngerplan) andere natürliche Einflussfaktoren ausgeschlossen, um die Zusammenhänge zwischen dem spektralen Verhalten und der Schwermetallkontamination einfacher zu ermitteln. Für den Zeitraum zwischen 2007 bis 2009 wurden zwei mehrjährige Versuchsreihen angesetzt. Anfang 2007 wurden aus den 3 morphologischen Einheiten der Aue (Abbildung 2.4) Bodenmaterial (30 cm, Oberboden) geholt und in 10-Liter-Gefäßen gesiebt und homogenisiert mit den in der Region dominanten Pflanzenarten angesetzt (Tabelle 3.1, Tabelle Anh. 1).

Ergänzend dazu wurde 2008 Bodenmaterial aus einer weiter entfernten Grünlandfläche und einem sehr hoch belasteten Standort an der Saalemündung (Breitenhagen) geholt, um eine höhere Spannweite zwischen den Belastungen zu erreichen (Tabelle 3.2, Tabelle Anh. 2).

Tabelle 3.1: Schwermetallbelastung der Böden der Gefäßreihe 2007 sowie die Bodenform und Morphologie.

Profil	Bodenform	Schwermetallbelastung des Bodens (mg/kg)			Morphologie
		As	Cd	Pb	
Wörlitz 20 (A)	Tschernitzen aus Auenschluffen	56	7	152	Niederterrasse
Wörlitz 21 (B)	Vegen aus Auenlehm	36	<2	86	Hochfläche
Wörlitz 22 (C)	Gleye aus Auentonschluffen	48	4	187	Rinne

Tabelle 3.2: Schwermetallbelastung der Böden der Gefäßreihe 2008 und die Bundesbodenschutzverordnungsgrenzwerte der jeweiligen Elemente.

Profil	Bodenform	Morphologie	Schwermetallbelastung des Bodens (mg/kg)				BBodSchV-Vorsorgewert (mg/kg)				BBodSchV-Maßnahmenwert (mg/kg)						
			As	Cd	Hg	Pb	As	Cd	Hg	Pb	As	Cd	Hg	Pb			
WöKo	Vegen aus Auenlehm	Hochfläche (Kontrollfläche)	28	<2	<2	60											
BR	Tschernitzen aus Auenschluffen	Niederterrasse	113	12	4	195											
WöNT	Tschernitzen aus Auenschluffen	Niederterrasse	69	7	3	173		1,5	1	100	50	20	2	1200			
WöHF	Vegen aus Auenlehm	Hochfläche	55	4	<2	143											

Insgesamt wurden 45 Gefäße (5 Arten a 3 statistische Wiederholungen und 3 Böden) aus dem Jahr 2007 und 48 Gefäße (4 Arten a 2 statistische Wiederholungen und 4 Böden) aus dem Jahr 2008 angesetzt (Tabelle 3.3, Abbildung 3.1).

Tabelle 3.3: Ausgewählte Pflanzenarten für die Spektromettermessungen.

Pflanzenart	Morphologie
Gemeiner Beifuß	Niederterrasse
Große Brennnessel	Niederterrasse
Knickfuchsschwanz	Rinne
Rohrglanzgras	Niederterrasse
Wiesenfuchsschwanz	Hochfläche



Abbildung 3.1: Foto vom Gefäßversuch 2008 am 14.05.08 (links) und Foto vom Gefäßversuch 2007 am 11.08.08 (rechts).

Vom Bodenmaterial wurden am Anfang der Vegetationsperiode je Standort 200 g zur Schwermetallanalyse abgenommen. Der Ablauf der Ernte der Vegetation für die Schwermetallanalysen wurde operativ entschieden (1mal pro Monat). Eine höhere Ernterate ist bei relativ ungestörtem Wachstum der Pflanzen nicht möglich. Die Proben wurden in einem Kühlbehälter aufbewahrt, um dissimilatorische Prozesse zu verringern. Neben den zeitlich engen spektralen Messungen des Gefäßversuchs wurden zusätzlich Feldmessungen innerhalb relevanter meteorologischer Zeitfenster durchgeführt.

Als Daten für die Arbeit stehen Bodenformenkarten, Vegetationskartierungen, Grundwasserflurabstandskarten und Analysen zu Schwermetallbelastungen zur Verfügung.

3.2 Analytische Untersuchungen

3.2.1 Schwermetalle und Nährstoffe

Durch die Kooperation mit dem Department Analytik des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig konnten die Schwermetallgehalte im Boden und in der Pflanze aus dem Gefäßversuch und Feld ermittelt werden. Weitere Analysen wurden durch die CBA GmbH Böhlen (DIN EN ISO/IEC 17025:2005) durchgeführt. Die Analysen ermittelten die Gehalte von, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Fe, Zn. Auch das Halbmetall As wird hierbei mit in die Klasse eingeordnet. Zusätzlich wurden noch die Elemente Ba, Ca, K, Mg, Na, P, S ermittelt. Für die sequentielle Extraktion mobiler, pflanzenverfügbarer Schwermetalle wird nach Bundes-Bodenschutzverordnung (Holzwarth, et al., 2000) Ammoniumnitrat/Ammoniumacetat verwendet (DIN 19730). Für die Analyse werden Pflanzenteile (Blätter) eines Bestandes bzw. einer Einzelpflanze abgeerntet und manuell zerkleinert. Dann werden die Blattteile in einem Trockenofen bei 60°C getrocknet und staubfein in einer Planeten-Kugelmühle (Retsch PM 400) zermahlen (Abbildung 3.2). Dabei werden Achat-Mahlkugeln verwendet, da andere metallhaltige Materialien wie Stahl die Analysen verfälschen würden.



Abbildung 3.2: Foto von der Planeten-Kugelmühle (links) und Foto von der Abfüllung des gemahlten Pflanzenmaterials (rechts).

Für die Bestimmung werden ein ICP-MS und ein ICP-AES eingesetzt. Mit dem Königswasseraufschluss bestimmt man die Schwermetall-Gesamtbelastung des Bodens (DIN ISO 11466). Dafür wurde das entnommene Bodenmaterial für die Analyse getrocknet.

3.2.2 Pigmente

Für die Feld- und Gefäßuntersuchungen werden jeweils die Pigmentkonzentrationen ermittelt. Damit kann ein wichtiger Pflanzenparameter für den Zustand der Pflanze erfasst werden. Dafür wird aus dem Blatt eine Teilprobe (5x5 mm) ausgeschnitten und die Masse (in g) bestimmt. Danach werden die Pigmente aus der Pflanzenprobe in einem Reagenzglas mit Methanol und Magnesiumhydroxidcarbonat bei ca. 80 °C extrahiert. Die Lösung der Pigmente wird 2-3-mal wiederholt und jeweils das Extrakt dekantiert bis die Pflanzenprobe weiß ist. Zusätzlich wird das Volumen des methanolischen Extrakts bestimmt. Das Extrakt wird bei 3000 U/min zwei Minuten lang zentrifugiert, um die Schwebstoffe zu eliminieren. Daraufhin erfolgt die Messung der Extinktion des Extraktes bei 470, 652, 665 und 720 nm mit Hilfe eines Spektralphotometers (Dr. Lange Cadas 100) (Abbildung 3.3). Die Ergebnisse werden in Formeln zur Bestimmung des Chlorophyll a und b sowie der Karotinoide eingesetzt (Metzner, et al., 1965; Humbeck, et al., 1996) (siehe Formel (1)).



Abbildung 3.3: Extrahierte Pigmentlösung aus den untersuchten Pflanzen (oben links), Spektralphotometer (oben rechts) und Chlorophyllgehaltsmessgerät SPAD-502 (www.envcoglobal.com) (unten).

Formel 3.1: Formel zur Berechnung der Konzentration von Chlorophyll a + b [$\mu\text{g}/\text{mg}$].

$$C_{\text{Chla+b}} \left[\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \right] = \left[(E_{665} - E_{720}) \cdot 1,44 + (E_{652} - E_{720}) \cdot 24,93 \right] \cdot \frac{V_{\text{Extr.}}}{M_{\text{Pfl.}}}$$

$C_{\text{Chla+b}}$ = Gehalt an Chlorophyll a+b [$\mu\text{g}/\text{mg}$]

E_n = Extinktion bei Wellenlänge $\lambda = n$ [%/100]

$V_{\text{Extr.}}$ = Volumen des methanolischen Extrakts [ml]

$M_{\text{Pfl.}}$ = Masse der Pflanzenprobe [g]

Da zu häufiges Abernten der Blätter die Qualität der Spektrometermessungen beeinflussen könnte, wurden mit Hilfe des Chlorophyllmeters (Minolta SPAD - 502) Messungen ohne Beschädigung des Bestandes durchgeführt (Abbildung 3.3). Es ist ein einfach zu bedienendes und schnelles Messgerät zur Bestimmung des Chlorophyllgehalts von Pflanzen. Hierbei wird die optische Dichte zweier Wellenlängen miteinander verrechnet.

Um die Genauigkeit des Gerätes zu verifizieren, wurden Proben mit dem SPAD 502 und der Chlorophyllextraktion durch Methanol gemessen. Die Analysen dienen zur Validierung und Verifizierung der Ergebnisse der Spektralanalyse (siehe Abschnitt 5.4).

3.2.3 Wassergehalt

Der Wassergehalt im Blatt wird über die Bestimmung der Frisch- und Trockenmasse ermittelt (nur bei Felduntersuchungen). Innerhalb von 24 h nach der Ernte werden die Blätter mittels einer Präzisionswaage mit eingebauter Libelle zum exakten ausrichten gewogen. Danach werden die Proben ca. 7 Tage luftgetrocknet, so dass eine Restfeuchte bleibt. Beide Werte werden miteinander verrechnet und der Blattwassergehalt in % angegeben.

3.3 Spektrometrische Feld- und Labormessungen

Die spektroradiometrischen Messungen mit dem Analytical Spectral Devices (ASD) Field Spec Pro FR[®] wurden sowohl unter natürlichen Bedingungen im Gelände (in situ) als auch im Gefäßversuch/Labor durchgeführt (Abbildung 3.4). Es handelt sich hier um ein nicht-abbildendes System, welches nur einen durch den Öffnungswinkel der Optik beschränkten Ausschnitt der Oberfläche punkthaft erfasst (Erasmí, 2002). Das ASD-Feldspektrometer misst verschiedene Bereiche des elektromagnetischen Spektrums, die einen quasi-kontinuierlichen Wellenlängenbereich von 400 bis 2500 nm abdecken (Voß, 2005). Die Feldmessungen sind stark vom Wettergeschehen abhängig, d.h. nur bei Strahlungswetterlagen kann eine hohe Qualität der Ergebnisse gewährleistet werden. Ebenso ist der Zeitraum auf maximal 5h (2,5 h vor und nach dem Sonnenhöchststand) beschränkt, da hier die geringsten Einstrahlungsveränderungen auftreten. Vor der Messung muss das Gerät ca. 20 - 30 min aufgewärmt werden, da sich die Empfindlichkeit der Detektoren während dieser Zeit verändert. Zur Kalibrierung des Spektrometers wird vor der ersten Messung sowie nach jedem Standortwechsel ein Weißabgleich mit einem Referenzstandard (Spectralon[®]) durchgeführt, um den Einfluss der veränderten Einstrahlungsbedingungen möglichst gering zu halten. Alle Aufnahmen wurden als Messungen der gerichteten spektralen Reflexion einer Oberfläche im Verhältnis zu der Referenzfläche durchgeführt (Relativmessungen). Das

Spectralon weist eine annähernd ideale, lambertsche Oberfläche auf. Ihre stark reflektierende Eigenschaft (98-99%) der einfallenden Strahlung im Bereich von 0,2 bis 2,5 μm macht sie im Vergleich zu anderen Referenzstandards zum Richtmaß. Dabei muss der Reflexionsstandard mindestens das Sichtfeld der Optik ausfüllen (Erasmí, 2002). Damit Veränderungen des Messsignals durch eine veränderte Orientierung der Messoptik minimiert werden, sollte die Aufnahmegeometrie über den Aufnahmezeitraum konstant sein. Deshalb werden die Messungen in Nadirposition durchgeführt. Die Messungen im Gelände wurden in einer maximalen Höhe von ca. 130 cm oder mit einem Abstand von ca. 30 cm zwischen dem Pflanzenbestand und der Optik des Gerätes durchgeführt, so dass die Aufnahmefläche der Objekte bei einem Öffnungswinkel des Sichtfeldes der Optik (field of view) von 25° annähernd gleich ist. Ebenso sollte die Orientierung des Geräts und Benutzers zur Messoptik gleich bleiben, um Veränderungen im Messsignal zu vermeiden (z.B. Schattenwurf). Für die Einzelpflanzen wurden 5 Parallelmessungen und im Bestand zwischen 5 - 50 Messungen in Abhängigkeit zur jeweiligen Fragestellung (Einzelpflanze oder Pflanzenbestand) durchgeführt. Die Messpunkte wurden mit Hilfe eines GPS in einem räumlichen Bezugssystem verortet und in ein GIS-Projekt übertragen.



Abbildung 3.4: Feldspektrometrische Messungen vom 21.06.08 (links) und Aufbau der spektrometrischen Labormessungen (rechts).

Die Labormessungen dienen dem Vergleich und der Validierung der Feldmessungen. Da die atmosphärischen und meteorologischen Einflüsse sowie die Bestandsgeometrie der Vegetation wegfallen, lassen sich im Labor standardisierte Objekte ausweisen. Diese bieten Informationen über das spektrale Verhalten der Blattebene. Das Spektrometerlabor des Instituts für Geowissenschaften ist eine Dunkelkammer, in der sich eine vorinstallierte Beleuchtungsquelle befindet. Diese ist eine Halogenlampe (Kaiser Studiolight 1000) mit 1000 W (3400 K) (Abbildung 3.4). Die Pflanzenprobe wird so ausgerichtet, dass der Lichtkegel auf den Probenmittelpunkt in einem Zenitwinkel von 15° trifft. Die Optik wird senkrecht zum Probenisch ausgerichtet. Der Messabstand richtet sich nach der Größe des Probenbehälters (\varnothing 10 cm) und beträgt in diesem Fall 13 cm. Die systematischen bodengestützten Messungen bieten eine Grundlage für die Entwicklung von Algorithmen für die Auswertung der Spektralkurven. Darauf aufbauend werden diese später auf flugzeuggestützte abbildende Spektrometer übertragen.

3.4 Fernerkundungsdaten

Die punkthaften Daten aus dem Feldversuch sowie der aus dem standardisierten Gefäßversuch entwickelte Algorithmus werden über eine simulierte Zwischenstufe auf den flächenhaften Datensatz übertragen. Die Fernerkundungssensoren der Forschungsarbeit sind spektral und räumlich hoch auflösende Daten (hyperspektral), die gut geeignet für eine spezifische Vegetationsanalyse und eine indirekte Bestimmung von Pflanzenparametern sind.

3.4.1 HyMap - Kampagne 2008 und 2009

Im Rahmen der Promotion konnten hyperspektrale HyMap-Daten verwendet werden. Die HyEurope2008 - Kampagne begann am 22.07. und endete am 07.08. Die Aufnahmen wurde koordiniert und durchgeführt vom Flugdepartment des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zugehörig der Helmholtz-Gemeinschaft. Die Fachgruppe Geofernerkundung und Kartographie der Martin-Luther-Universität beteiligte sich in enger Kooperation mit dem deutschen GeoForschungszentrum Potsdam (GFZ) an diesem europäischen Experiment. Die Testgebiete umfassen die Region der Muldeauen. Es wurden 2 Datensätze aufgenommen, wobei einer für die Ziele der Forschungsarbeit von Bedeutung ist. In Abbildung 3.5 ist ein Datensatz von 2008 und in Abbildung 3.6 die geographische Lage der Daten zu erkennen.

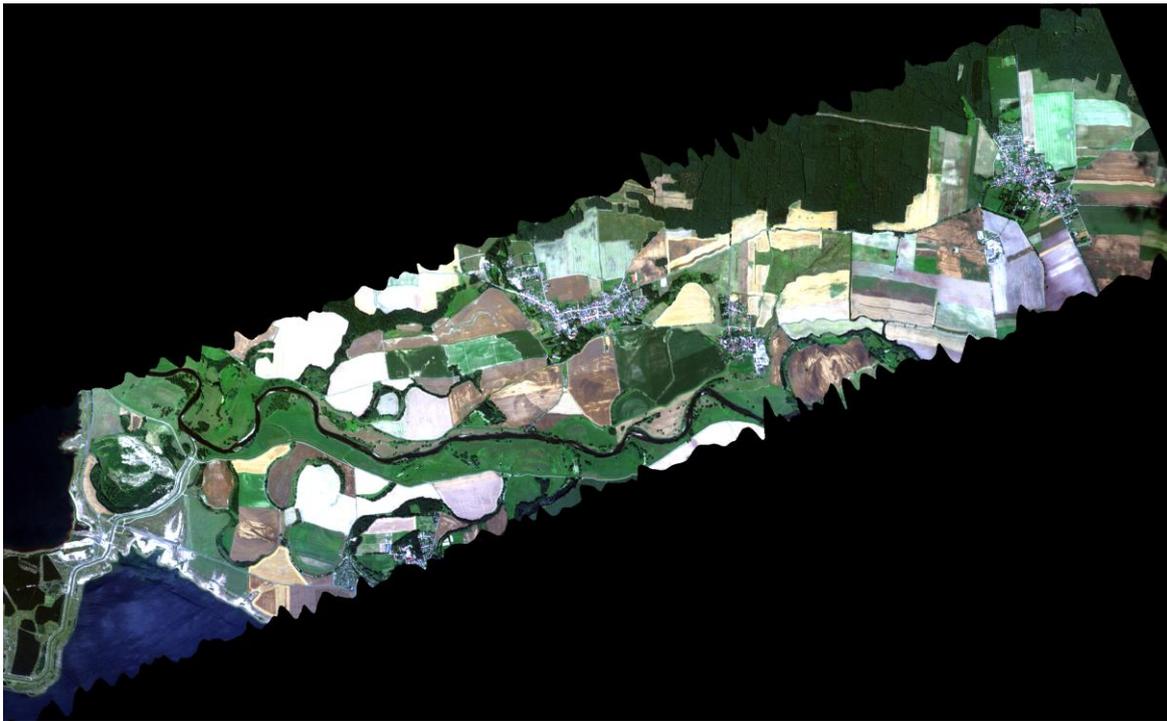


Abbildung 3.5: Ausschnitt der Daten in der Muldeauenregion der HyEurope2008-Kampagne vom 28.07.08.

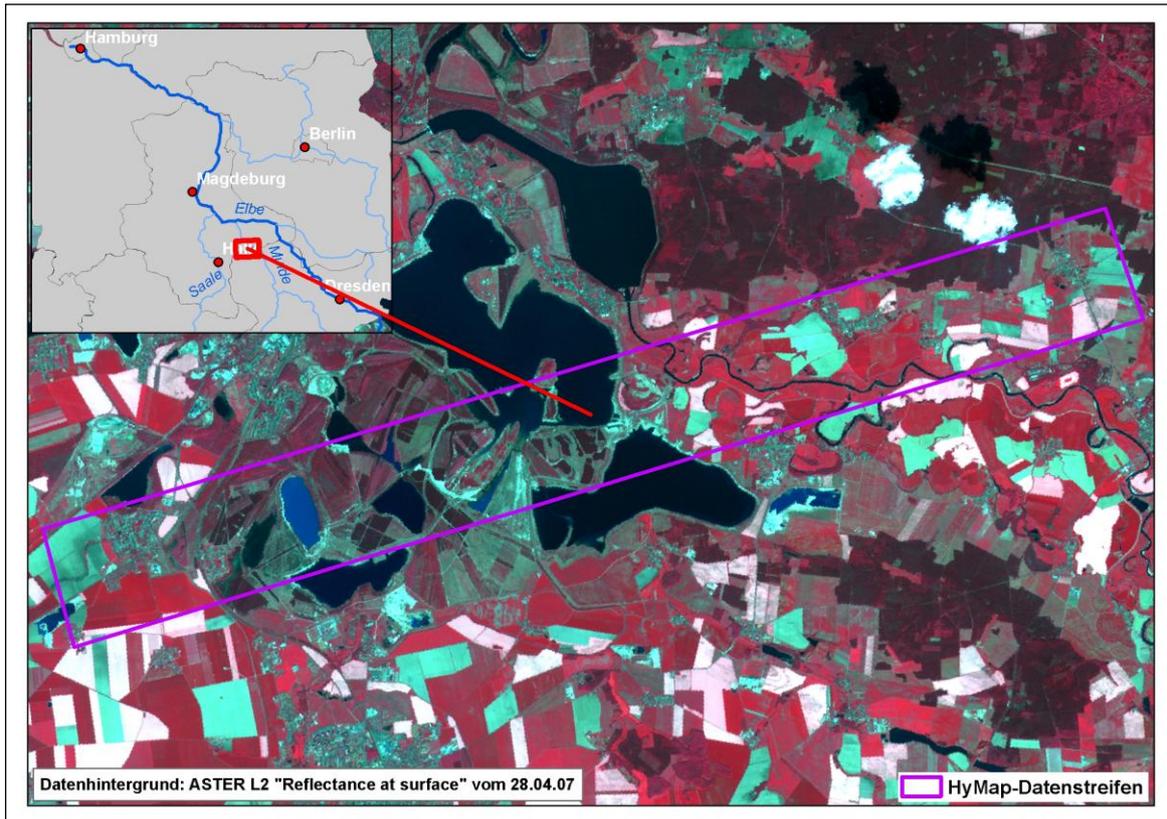


Abbildung 3.6: Einordnung der HyMap-Datenlage ins Untersuchungsgebiet.

Dieser wurde am 28.07.08 um 12:40 Uhr mit einer Wolkenbedeckung von unter 5 % aufgenommen (Tabelle 3.4). Auf dem Gebiet ist die Mulde im Bereich unterhalb des Muldestausees dargestellt. Dieser wurde insbesondere durch das Extrem-Hochwasser im August 2002 beeinflusst, das eine hohe Lösung im Wasser und anschließende Akkumulation der schwermetallbelasteten Sedimente über die Auenvegetation bedingte.

Die HyEurope-Kampagne 2009 wurde vom DLR „EnMap-Nutzungsvorbereitung - Unterstützung der Hochschulforschung mit HyMap-Hyperspektraldaten“ gefördert. Die Befliegungen fanden im Zeitraum vom 21.07.09 bis 01.09.09 statt. Ein von den beflogenen zwei Streifen für die MLU beinhaltet den Bereich der Mulde. Die Angaben zum Datensatz von 2009 befinden sich in Tabelle 3.4.

Tabelle 3.4: Fluginformationen zum HyMap-Datensatz im Bereich der Mulde.

HyMap-Datensatz	2008	2009
Aufnahmedatum	28.07.2008	19.08.2009
Aufnahmezeit	12:40 UTC	13:55 UTC
Überflughöhe	2500 m ü. NN	2053 m ü. NN
Richtung	250 °	251
Spektralbereich	400-2500 nm	400-2500 nm
Spektrale Auflösung	ca. 16 nm	ca. 16 nm
Spektralbänder	125	125
geometrische Bodenauflösung	5 m	4,5 m

Der HyMap-Sensor wurde in Australien von der Firma Integrated Spectronics entwickelt und wird von der HyVista Corp. vertrieben. Das System ist als Whisk-Broom-Scanner umgesetzt worden. Mittels 4 verschiedener Detektoren wird in einem Wellenlängenbereich zwischen 400 und 2500 nm mit 125 Kanälen die Strahlungsenergie aufgenommen. Die spektrale Bandbreite beträgt dabei ca. 16 nm. Das Gerät besitzt außerdem ein extrem hohes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) von mehr als 500:1. Es gilt als Maß für die Qualität eines aus einer Quelle stammenden Nutzsignals, das von einem Rauschsignal überlagert ist. Der hyperspektrale Sensor wird ebenso durch eine hohe räumliche Auflösung von ca. 5 m gekennzeichnet. Diese Eigenschaften machen HyMap zu einem wertvollen Instrument für den Vergleich mit hoch aufgelösten spektrometrischen Messdaten. Die geometrische Korrektur erfolgte durch das DLR und die atmosphärische Korrektur durch das GFZ (im Jahr 2008) und das DLR (im Jahr 2009). Ziel der geometrischen Korrektur ist die geometrisch richtige Darstellung der abgebildeten Objekte an sich und in ihrer gegenseitigen Lage. Bei Flugzeugscannern können die Oberflächenform, die unterschiedlichen Abstände zum Gelände von der Bildmitte zum Rand (Panorameffekt) sowie zufällige Bewegungen des Flugzeugs durch z.B. Turbulenzen die Verzerrungen verursachen. Für die Korrektur ist ein Global Positioning System (GPS) notwendig (www.uibk.ac.at). Bei der atmosphärischen Korrektur werden mit einem Modell unter Verwendung bestimmter Parameter der Atmosphäre zum Zeitpunkt der Aufnahme (Wasserdampfgehalt, Ozon, Temperatur etc.) die atmosphärischen Einflüsse heraus gerechnet (www.sbg.ac.at).

3.4.2 AISA

In Kooperation mit dem Department Landschaftsökologie (AG Modellierung, Fernerkundung und Datenassimilation - Dr. Angela Lausch) des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung in Leipzig konnte eine Befliegung mit einem abbildenden Spektrometer im Rahmen des TERENO-Erdbeobachtungsnetzes umgesetzt werden. Das *Airborne Imaging Spectrometer for Applications* (AISA) wurde von *Spectral Imaging* (Specim) in Finnland produziert. Das Spektrometer ist als flugzeuggetragenes Instrument in den frühen 90er Jahren entwickelt worden. Eines der Hauptziele war die Entwicklung eines bezahlbaren abbildenden Spektrometers für die Forschung und die operationale Anwendung. AISA ist ein *Pushbroom-Scanner* mit einem CCD-Detektor mit einer Zellgröße von 384 zu 286 Pixel. Der Spektralbereich des AISA Eagle liegt zwischen 395 und 973 nm mit einer mittleren spektralen Abtastung von 2,3 nm. Die Vorteile des AISA sind, dass der User die Nummer, Lage und Bandbreite der Spektralkanäle innerhalb des Wellenlängenbereichs frei wählen kann. In diesem Fall wurde die Option 2 ausgewählt mit 252 Bändern. Die räumliche Auflösung ist abhängig von der Flughöhe, bei 750 m ü. NN ist die Pixelgröße 1 m. Das Spektrometer erzeugt kontinuierliche Bilder in engen Spektralbändern. Zusätzlich zu den Eigenschaften der räumlichen Genauigkeit und der spektralen Auflösung steht die gute radiometrische Präzision. Es gibt 3 Modelle: der AISA+, der AISA Eagle und der AISA Hawk (Tabelle 3.5). Die ersten Beiden decken die VNIR Region ab, während der letztere im SWIR operiert. Die Daten wurden am 03.07.2008 vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig durchgeführt. Dabei wurde der Bereich der mittleren Elbe (Wörlitz) mit Hilfe eines Leichtflugzeugs (Trike) befliegen (Abbildung 3.7). Ebenso wurden die notwendigen geometrischen Korrekturen durch das UFZ durchgeführt. Die geographische Lage der insgesamt 5 Flugstreifen zeigt die Abbildung 3.8. Die Abbildung 3.9 stellt ein Mosaikbild der Schleusenheger Wiesen bei Wörlitz in Echtfarb und in Color Infrared dar. Damit können die in der Forschungsarbeit entwickelten und angewandten Algorithmen zur

Schwermetalldetektion an punkthaft gemessenen Daten auf die flächenhaften korrigierten Daten von HyMap und AISA übertragen werden.

Tabelle 3.5: Eigenschaften des AISA Eagle.

AISA Eagle	
Flugzeit	03.07.2008
Aufnahmezeit	10-12 Uhr (Ortszeit)
Spektralbereich	395-973 nm
Flughöhe	750 m
Streifenbreite	483 m
Spektrale Auflösung	2,3 nm
Spektralbänder	252
Schwadbreite	512 Pixel
geometrische Bodenauflösung	1 m
FOV	36,7 °



Abbildung 3.7: AISA Eagle Hyperspektralsensor (links) und Ultraleichtflugzeug (Trike) (links).

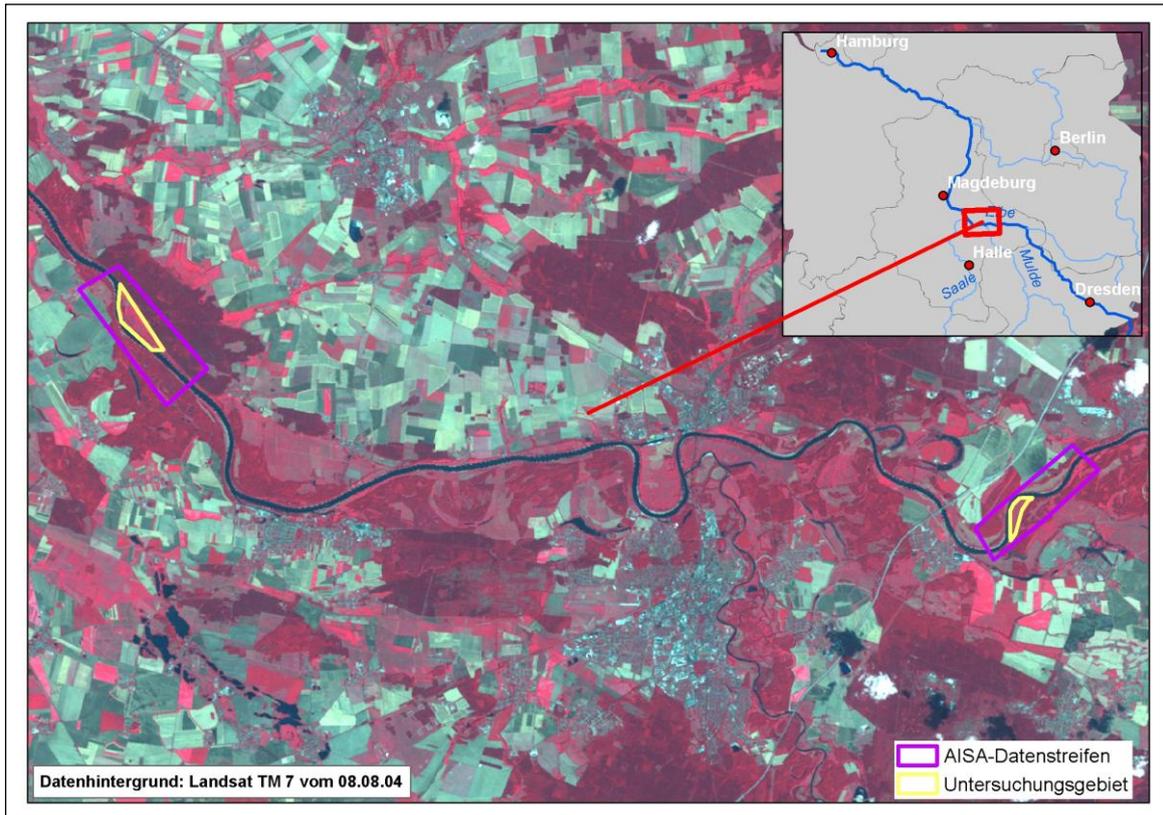


Abbildung 3.8: Einordnung der AISA-Datenlage ins Untersuchungsgebiet.

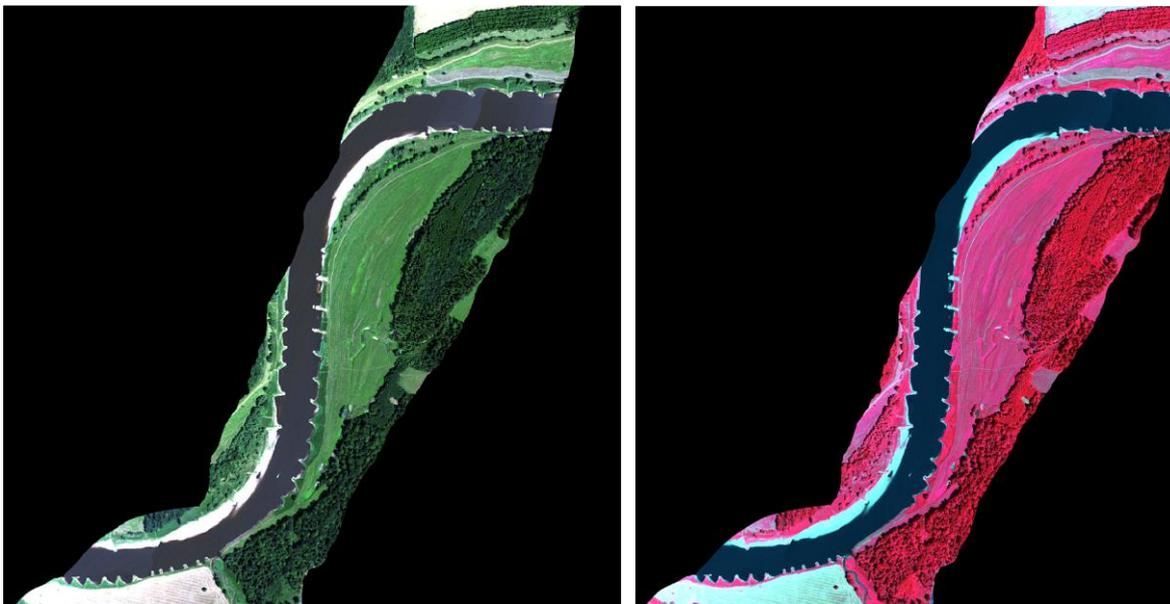


Abbildung 3.9: Aufnahme der „Schleusenheger Wiesen“ bei Dessau mit dem Hyperspektralsensor AISA-EAGLE vom 03.07.2008 - Echtfarb (links) und CIR (rechts).

3.5 Zusatzdaten

Durch die Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Halle, Sektion Bodenchemie (Prof. Neue, Prof. Rinklebe), standen noch weitere Daten wie

Vegetationskartierungen, Bodenleitprofile, Bodenformenkarten und Schwermetallanalysen des Bodens für die Elbaue zur Verfügung (Abbildung 3.10). Aufgrund dieser Daten wurde die Auswahl der Standorte für die Forschungsarbeit gewählt.

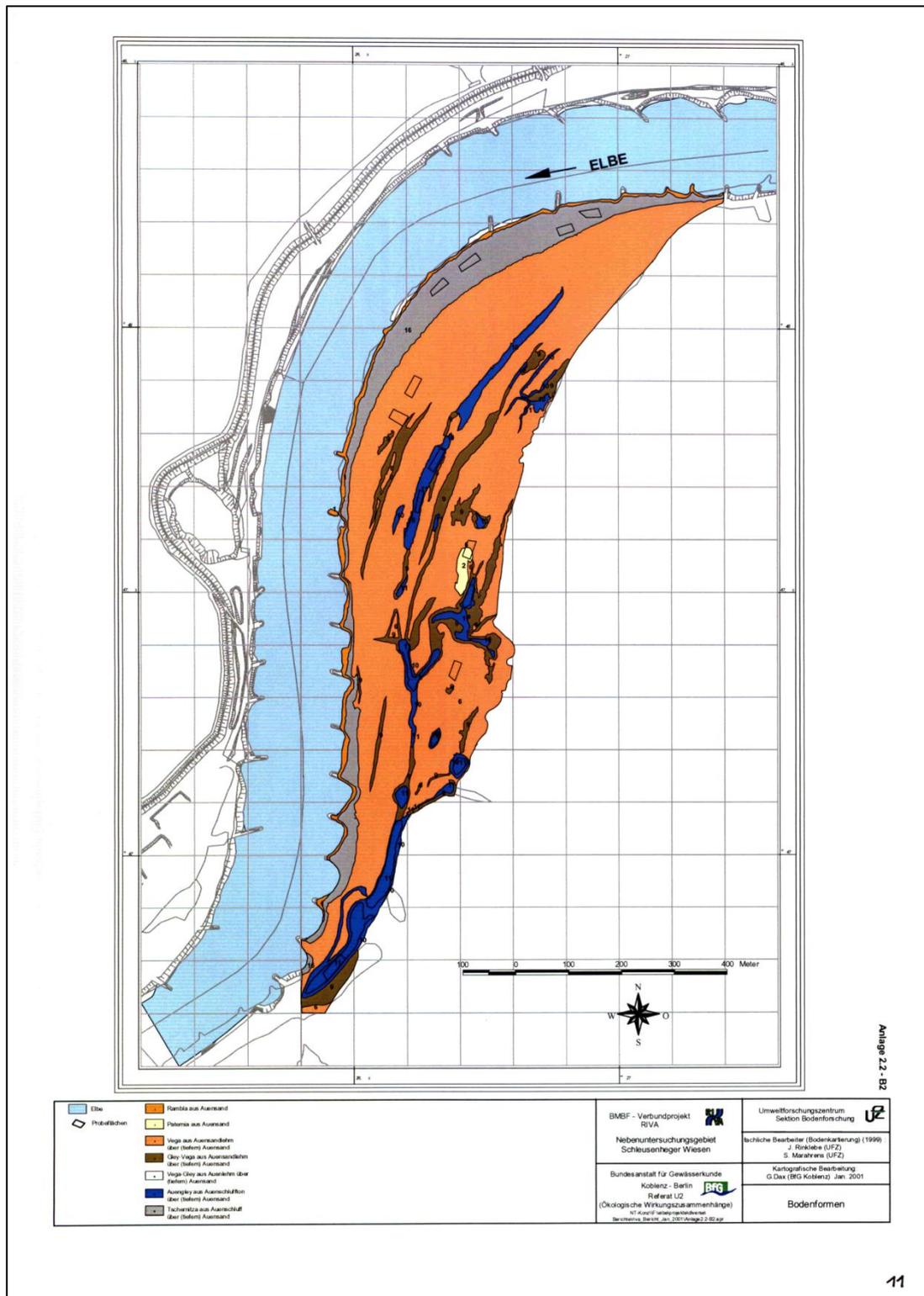


Abbildung 3.10: Bodenformenkarte des Untersuchungsgebiets „Schleusenheger Wiesen“ bei Wörlitz.

4 Algorithmusentwicklung

Die folgenden Abschnitte zeigen die Arbeitsschritte für die Entwicklung eines Algorithmus zur Detektion und Trennung von Schwermetallstress bei Auenpflanzen (Abbildung 4.1). Die Grundlage der spektrometrischen und analytischen Daten wird durch die Gefäßversuchsreihen gebildet. Neben den vorverarbeitenden Schritten der Rohdaten, den statistischen Auswertungen und Korrelationsanalysen werden neue Methoden zu referierten Methoden der Literatur zugeordnet und deren Güte innerhalb einer Prozesskette ermittelt. Die Ergebnisse und deren Diskussion werden im Kapitel 5 aufgezeigt.

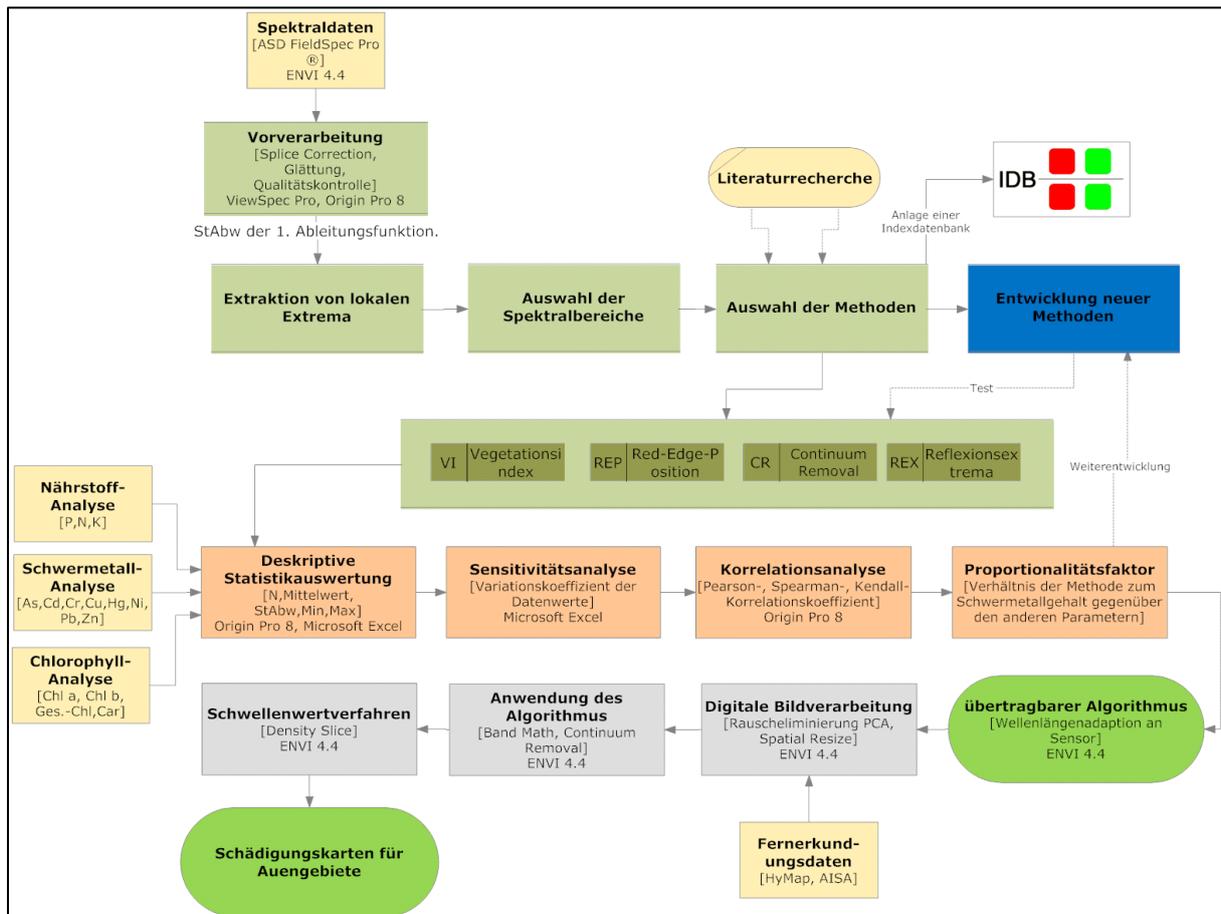


Abbildung 4.1: Arbeitsschritte zur Algorithmusentwicklung zur Schwermetallstressdetektion bei Auenvegetation und Übertragung auf Fernerkundungsdaten.

4.1 Vorverarbeitung der Spektraldaten

Die im Feld- oder Labor gemessenen Rohdaten werden für die spätere Normierung vorverarbeitet. Diese qualitative Analyse erfasst die Spektraldaten der Parallelmessungen, bei denen entweder technische Messfehler aufgetreten sind oder die durch atmosphärische, meteorologische sowie bestandgeometrische Einflüsse eine hohe Abweichung vom Mittel haben. Bei einem Variationskoeffizienten (C_v) größer 0,2, d.h. einer hohen Standardabweichung eines Spektrums vom Mittelwert der Parallelmessungen, kommen diese nicht weiter in Betracht. In einigen Fällen traten Offset-Fehler zwischen den drei Detektoren des Instruments auf (bei 1000 nm und 1780 nm). Diese wurden vor der

eigentlichen Spektralanalyse mit Hilfe der *Splice-Correction*-Funktion im Programm ASD View Spec Pro korrigiert (Abbildung 4.2).

Der nächste Schritt ist die Glättung der Spektralkurven durch verschiedene Frequenzfiltertechniken. Dieser beabsichtigt die Unterdrückung unerwünschter geräteinterner Rauscheffekte. Für die Glättung wurden verschiedene Filterbreiten getestet (Abbildung Anh. 7). Es wurde die Breite 11 gewählt, d.h. der gefilterte Zentrumswert und jeweils 5 links und rechts davon liegende Datenpunkte. Bei dieser Breite bleiben die schmalen Absorptionsbanden erhalten (z.B. Wasserbande bei 980, Lignin-Stärke-Protein-Banden bei 1690, 1725, 1736 nm). Der getestete Mittelwertfilter glättet die Kurve stark und unterdrückt somit wichtige Merkmale. Der Gaußfilter sowie der Savitzky-Golay-Filter erzielen bessere Resultate, da bei ihnen die wichtigen Merkmalsbanden erhalten bleiben. Insgesamt wurde der letztgenannte Filter als geeignetster gewählt (Savitzky, et al., 1964). Ebenso wurden mittels des Variationskoeffizienten Bereiche mit starker Variation ($C_v = 0,18$) innerhalb des Spektrums eliminiert, insbesondere die der Wasserbanden (atmosphärische Streuung) sowie der Anfang und das Ende des Spektralbereichs (Abbildung 4.3, Abbildung 4.4). Dann werden aus den Wiederholungen eines Objekts Mittelwerte gebildet. Die gesamten Spektren werden in eine *Spectral Library* übertragen. Damit können sie als Vergleichsspektren für die Fernerkundungsdaten dienen. Eine Angleichung der spektralen Auflösung an verschiedene Sensortypen wird durch eine Veränderung der Kanalanzahl simuliert.

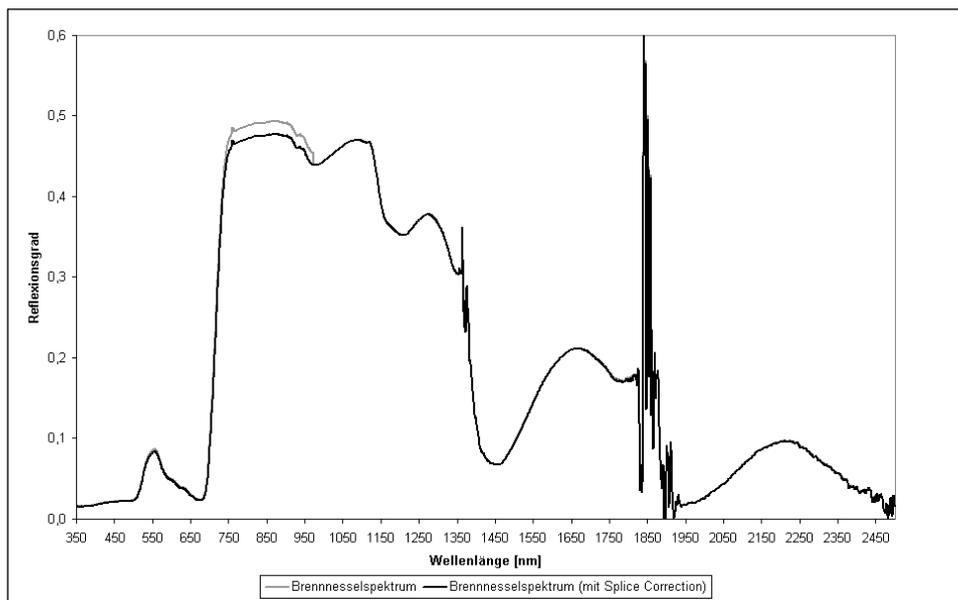


Abbildung 4.2: *Splice Correction* der Reflexionskurve am Beispiel Brennessel.

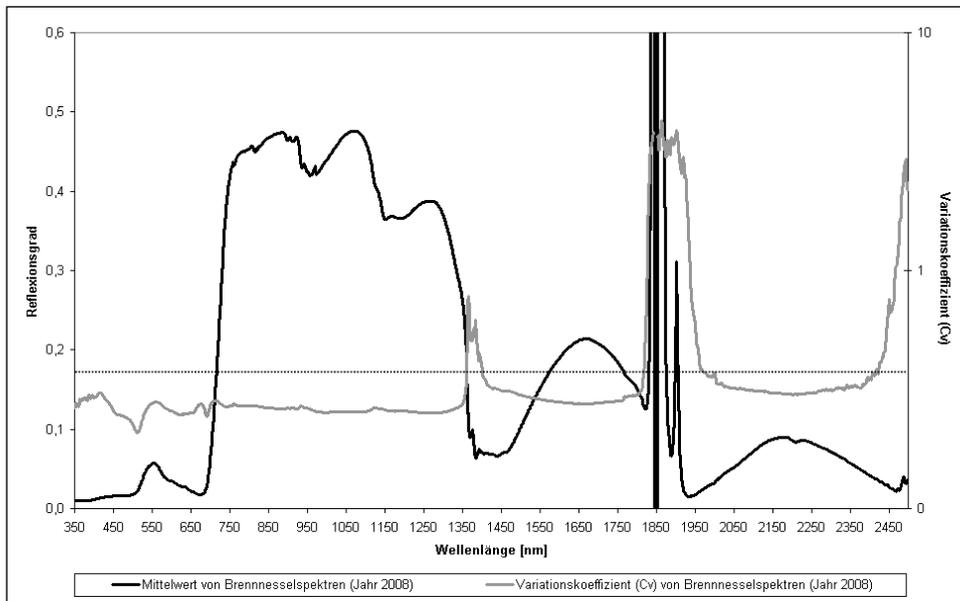


Abbildung 4.3: Variationskoeffizient zwischen Parallelmessungen der Gefäßreihe von 2007 im Jahr 2008 am Beispiel Brennessel.

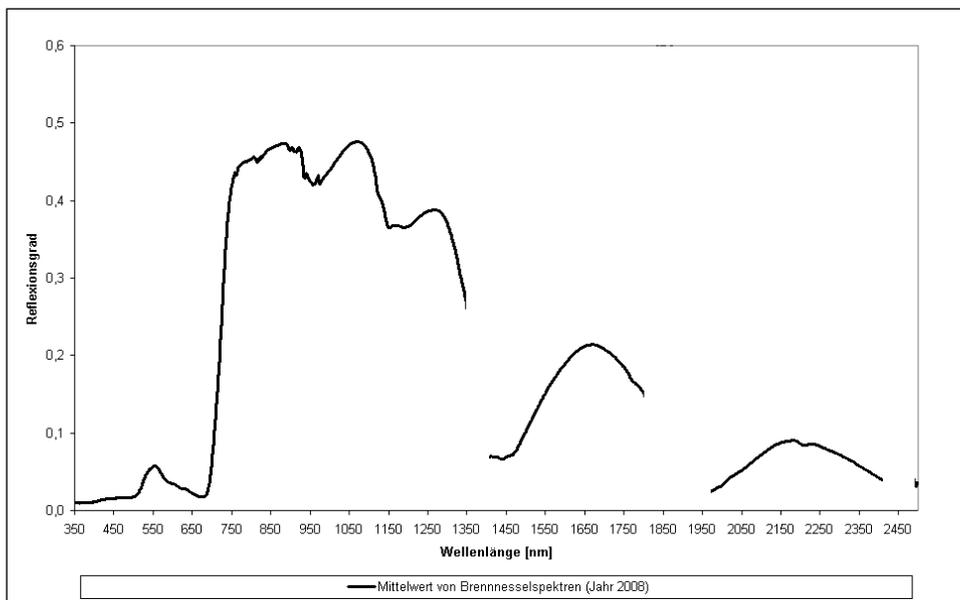


Abbildung 4.4: Eliminierte Spektralbereiche mit zu hohem Variationskoeffizienten am Beispiel Brennessel.

4.2 Bestimmung von lokalen Extrema und Selektion der Spektralbereiche

Für die Selektion der relevanten Spektralbereiche werden die deskriptiv statistischen Merkmale der korrigierten Gesamtheit der Spektren untersucht. Dabei werden Spektralsignaturen über den phänologischen Zeitraum sowie zwischen den unterschiedlich kontaminierten Böden auf Variabilität charakterisiert. Die statistischen Parameter sind der Mittelwert, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient. Bereiche mit höheren Variationen können als Bereiche mit höherem Informationsgehalt für die Ableitung von Zustandsparametern gelten und eine pflanzenphysiologische Veränderung, die verschiedene Ursachen haben kann, aufzeigen. Mittels der Standardabweichung der ersten Ableitung der Spektren über den Messzeitraum 2007 bzw. 2008 und den verschiedenen

Untersuchungsstandorten wurden 6 Bereiche mit hohen bzw. stark wechselnden Extrema (Wendepunkte, Minima, Maxima) berechnet (Abbildung 4.5 grau unterlegt). Dazu zählen der Bereich von 430-770, 910-1020, 1080-1200, 1260-1450, 1660-1950 und 2180-2300 nm. Die Bereiche am Anfang und am Ende des Spektralbereichs des Sensors unterliegen einem Signalrauschen des Sensors und werden für die weitere Betrachtung nicht genutzt. Die Tabelle 4.1 zeigt diese mit den zugeordneten Methoden der Literatur.

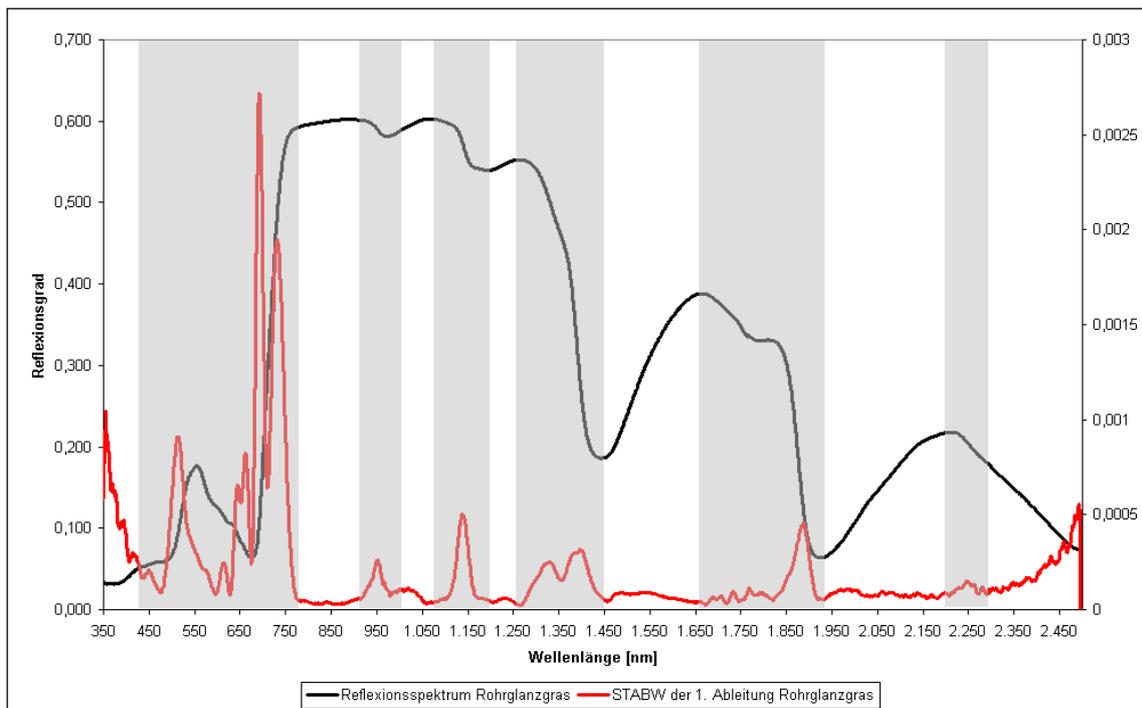


Abbildung 4.5: Bestimmung der lokalen Extrema der Gesamtheit der Spektren vom Gefäßversuch 2007 im Zeitraum 2008.

4.3 Auswahl der Methoden

Die Grundlage für die Auswahl der Methoden ist die Auseinandersetzung mit der relevanten Literatur im Bereich Pflanzenphysiologie, Stressphysiologie, Fernerkundung und digitale Bildverarbeitung (siehe Abschnitt 1.3 „Stand der Wissenschaft“). Es wurde ebenso darauf geachtet, dass nicht nur die 6 ermittelten Bereiche der lokalen Extrema, sondern auch verschiedene Pflanzenparameter und Methodentypen abgedeckt werden, um einerseits mögliche Stressfaktoren zu bestimmen und andererseits ein Spektrum an Verfahren über den relevanten Spektralbereich aufzuweisen. Dabei wurden 4 Reflexionsextrema (Minima, Maxima), 35 Vegetationsindizes (u.a. Ratios, *Normalized Difference*, Ableitungsindizes, logarithmisierte Indizes, Summenindizes), 2 Verfahren zur REP-Bestimmung sowie 3 *Continuum-Removal*-Methoden untersucht und verglichen (Tabelle 4.1). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Indexdatenbank (IDB) (im *Aufbau*) mit über 50 Vegetationsindizes erstellt (Henrich, et al., 2009). Dabei können die Nutzer nach Sensor, Objekt und Untersuchungsparameter selektieren. Die Beschreibung der Methoden und die dazugehörigen Referenzen befinden sich in Abschnitt 1.3.6 Methoden der Fernerkundung zur Stressdetektion“.

Tabelle 4.1: Methodenübersicht der Forschungsarbeit.

Bereiche [nm]	Methode	Parameter
430-770	Anthocyanin Content Index (ACI) Anthocyanin reflectance index (ARI) Carter Index 1 (Ctr1) Carter Index 2 (Ctr2) Edge-green first derivative normalized difference (EGFN) GRatio 1 Green Peak Reflexionswert (GP) Green-green first derivative normalized difference (GGFN) Leaf Chlorophyll Index (LCI) Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI) Modified Normalized difference index (mND705) Normalized Difference Pigment Index (NDPI) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Normalized Phaeophytinization Index (NPQI) Normalized Pigment Chlorophyll Index (NPCl) Photochemical Reflectance Index (PRI) Pigment-specific Normalised Difference Index PSNDc Plant Senescence Reflectance Index (PSRI) Ratio Vegetation Index (RVI) Red Edge Position (REP first derivation) Red Edge Position (REP linear model) Red Trough Reflexionswert (RT) Red-edge Vegetation Stress Index (RVSI) Simple Ratio Pigment Index (SRPI) Structurally independent xanthophyll index (SIXI) Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)	Anthocyanin Anthocyanin Chlorophyll Chlorophyll Physiologischer Zustand Vitalität? Physiologischer Zustand Physiologischer Zustand Chlorophyll Chlorophyll Chlorophyll Karotinoide/Chlorophyll Vitalität, Biomasse, LAI Chlorophyllzerfall Gesamtpigment/Chlorophyll LUE Karotinoide Karotinoide/Chlorophyll Vitalität, Biomasse, LAI Red-Edge-Position Red-Edge-Position Physiologischer Zustand Red-Edge Karotinoide Xanthophyll Karotinoide/Chlorophyll a
910-1020	Continuum removal analysis at 970 nm (CR970) Water Band Index (WBI)	Wasser Wasser
1080-1200	GR1140 GRatio 2 Normalized Difference Water Index (NDWI)	Wasser Wasser Wasser
1260-1450	Continuum removal analysis at 1350 nm (CR1350)	?
1660-1950	Continuum removal analysis at 1725 nm (CR1725) Disease Water Stress Index 5 (DWSI-5) GR1890 Moisture Stress Index (MSI) Normalized Difference Infrared Index (NDII) Normalized Difference Lignin Index (NDLI) Normalized Difference Moisture Index (NDMI) Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI)	Lignin, Protein ? Wasser ? Wasser Wasser Lignin Wasser Stickstoff
2180-2300	Cellulose Absorption Index (CAI) Lignin Cellulose Absorption Index (LCA)	Cellulose Cellulose, Lignin

LUE = Lichtausnutzungseffizienz der photosynthetisch aktiven Strahlung
 Fett markierter Text = neu entwickelte Methoden bzw. normierte Spektralbereiche

4.4 Entwicklung neuer Methoden

Im Bereich der Parametrisierung von Vegetationsparametern gibt es eine Vielzahl von Methoden. Ziel der Arbeit ist es eine Methode zu finden, die direkt oder indirekt die Schwermetallbelastung und somit den Stress für die Pflanzen bestimmt und von anderen Stressarten trennt. Auf der Basis der angesetzten Gefäßversuche konnten im ersten und zweiten Jahr mit Hilfe der gemessenen Spektraldaten über lokale Variationen in 6 Spektralbereichen (siehe Abschnitt 4.2 Bestimmung von lokalen Extrema und Selektion der Spektralbereiche“), die empfindlichen und die nicht-sensiblen Wellenlängen aufgezeigt werden. Es wurden 2 Reflexionshöhen an jeweils empfindlichen Wellenlängen (Bereich lokaler Extrema), 2 *Simple Ratios* sowie 3 *Continuum-Removal*-Methoden entwickelt (siehe Tabelle 4.1, fett formatiert). Die zwei Reflexionshöhen liegen im Bereich zwischen einer Schulter und dem Tiefpunkt von Wasserbanden (1140 und 1890 nm). Hierbei ist die Verschiebung bzw. Veränderung der Banden für die Sensibilität des Spektralbereichs verantwortlich. Die entwickelten Ratios zeigen einerseits ein Verhältnis der Wasserbande bei 1170 nm zu der Reflexionsschulter bei 1130 nm und andererseits den Bereich des variierenden Anstiegs vom roten Licht zum nahen Infrarot bei 750 nm und einem nicht-sensiblen Bereich bei 1080 nm. Die Kontinuumtransformation wurde für drei sehr schmale Banden in den Bereichen um 970, 1350 und 1725 nm angewandt. Hierbei ist die normierte Tiefe der Bande für die Bestimmung relevant. Folgende Formeln wurden erzeugt:

Formel 4.1: Reflexionshöhe bei 1140 nm (GR1140).

$$GR_{1140} = R_{1140}$$

Formel 4.2: Reflexionshöhe bei 1890 nm (GR1890).

$$GR_{1890} = R_{1890}$$

Formel 4.3: Ratio der Reflexionshöhe zwischen 1080 nm und 750 nm (GRatio 1).

$$GRatio\ 1 = \frac{R_{1080}}{R_{750}}$$

Formel 4.4: Ratio der Reflexionshöhe zwischen 1130 nm und 1170 nm (GRatio 2).

$$GRatio\ 2 = \frac{R_{1130}}{R_{1170}}$$

Formel 4.5: Tiefe der Bande innerhalb des Kontinuumbereichs zwischen 930 und 1000 nm (CR970).

$$CR_{970} = \frac{S_{CR970}}{C}$$

Formel 4.6: Tiefe der Bande innerhalb des Kontinuumbereichs zwischen 1330 und 1390 nm (CR1350).

$$CR_{1350} = \frac{S_{CR1350}}{C}$$

Formel 4.7: Tiefe der Bande innerhalb des Kontinuumbereichs zwischen 1690 und 1740 nm (CR1725).

$$CR_{1725} = \frac{S_{CR1725}}{C}$$

R = Reflexion, S_{CR} = kontinuum-bereinigtes Spektrum, S = Originalspektrum, C = Kontinuumkurve

Die Methodenentwicklung fand während der gesamten Forschungsarbeit sowie durch Prüfung innerhalb der Prozesskette des Verfahrens statt. Die Güte und Robustheit der neuen Methoden wird im Rahmen der nachfolgenden Schritte bestimmt.

4.5 Normalisation

In der Forschungsarbeit werden verschiedene Formen der Normierung von Spektralkurven angewandt (siehe 4.3 Auswahl der Methoden). Es werden Gesamt- sowie Teilbereiche des Spektrums untersucht. Dabei werden folgende mathematische Verfahren zur Analyse der Spektralkurve angewandt:

- Die Parametrisierung der Reflexionsmessungen durch Reflexionsmaxima, Vegetationsindizes und die des Rot-Infrarot-Anstiegs durch die Bestimmung der Beugungswellenlänge (Red-Edge-Position).
- Die Funktionsanalyse der Spektralkurve durch die Ableitung lokaler Extrema (Minima, Maxima, REP) unter Anwendung der Ableitungs- und Kontinuumsfunktion.

Die Methoden werden im Origin Pro® 8 und Microsoft Office Excel 2007 aus den vorverarbeiteten Spektren berechnet. Dabei werden sie jeweils nach Jahr und Versuch extra tabellarisiert.

4.6 Deskriptive Statistikauswertung der Analysedaten und Methodenwerte

Bei der statistischen Analyse werden häufig deskriptive Statistiken erstellt. Sie bieten ein allgemeines Bild der Daten und helfen über nachfolgende Analysen zu entscheiden. Um eine Deskriptive Statistik vornehmen zu können, müssen die Skalenniveaus (Nominal, Ordinal, Metrisch) bekannt sein, um die Maße der zentralen Tendenz, die Konzentrations- und Streuungsmaße, bivariate Zusammenhangsmaße und die Darstellungsformen anwenden zu können. Da alle Variablen in der Arbeit metrisch sind, werden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung zu den unvariierten Maßzahlen. Als Parameter werden die Gesamtanzahl der Daten (n), Mittelwert (MW), Minimum (Min), Maximum (Max), Standardabweichung (StAbw), Schiefe, Variationskoeffizient (Cv) und geometrische Mittelwert berechnet. Die Daten werden zur Anschauung im Box-Diagramm (Tukey, 1977) dargestellt (Tabelle 4.2). Die Boxplots zeigen eine Box, durch die das 25. und das 75. Perzentil bestimmt werden. Die Whisker werden durch das 5. und 95. Perzentil bestimmt. Die Minimum- und Maximum-Werte werden durch die Kreuze symbolisiert. Der durchgehende Strich zeigt den Medianwert und das Quadrat den Mittelwert (Kammermeyer, et al., 2000) (Abbildung 4.6).

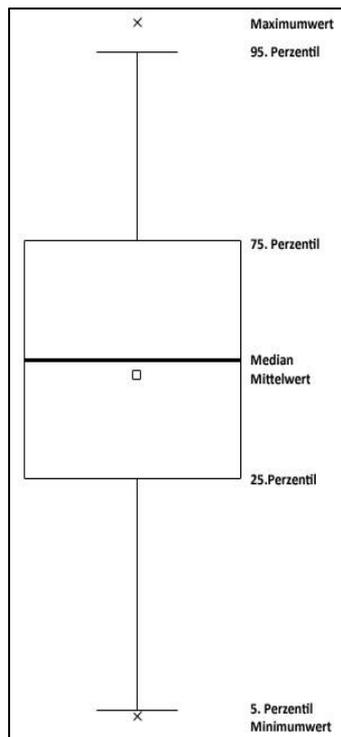


Abbildung 4.6: Aufbau eines Boxplots (nach Kammermeyer et al. 2000).

Tabelle 4.2: Übersicht der verwendeten deskriptiven Statistik.

Maße der zentralen Tendenz	Konzentrations- oder Streuungsmaße	Darstellungsform	Bivariate Zusammenhangsmaße
Arithmetisches Mittel	Range, Standardabweichung, Varianz, Schiefe	Histogramm, Boxplot	Korrelation (Pearson, Spearman)

Ebenso wird der Normalitätstest zur Beschreibung empirischer Variablen durchgeführt. Die Normalverteilung zeigt eine symmetrische Verteilungsform in Form einer Glocke, bei der sich die Werte der Zufallsvariablen in der Mitte der Verteilung konzentrieren und mit größerem Abstand zur Mitte immer seltener auftreten. Zusätzlich bietet sie eine Entscheidungshilfe zur Wahl des richtigen Zusammenhangsmaßes (Pearson, Spearman). Diese Tests haben unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich der Art der Abweichungen von der Normalverteilung, die sie erkennen. Der Kolmogorov-Smirnov-Test erkennt Abweichungen in der Mitte der Verteilung eher als Abweichungen an den Rändern (Hogg, et al., 2006). Beim Lilliefors-Test muss im Gegensatz zum Kolmogorov-Smirnov-Test nicht standardisiert werden (μ und σ der angenommenen Normalverteilung dürfen unbekannt sein) (Lilliefors, 1967). Der Shapiro-Wilk-Test gilt heute als bestes Verfahren (Shapiro, et al., 1965). Als Ausgabedesign wurde das Histogramm mit einer Normalverteilungskurve ausgewählt.

4.7 Sensitivitätsanalyse der Methoden

Die Ausgabedaten der relativen Normierung werden auf ihre Sensitivität getestet, d.h. ob die Methodenwerte innerhalb der Gesamtheit bzw. zwischen den Kontaminationsgraden (Böden) der Spektren variieren. Die untersuchten Pflanzenparameter der jeweiligen Methoden können variabel im Messzeitraum oder im Kontaminationsgrad sein und so die Ursache für den Stresseinfluss erklären. Hierbei wird der Variationskoeffizient (Cv) als

statistisches Maß genutzt. KOSTRZEWSKI et al. (2003) beschreiben die Nutzung des Variationskoeffizienten zur Bestimmung von Stickstoff- und Wasserstressindizes und auch die bessere Eignung gegenüber dem Mittelwert der Indizes. Bei Untersuchungen von RAY et al. (2004) wurden zur Analyse der Variabilität der Boden und Spektralparameter der Cv berechnet. Als Ergebnis konnten Bodenfruchtbarkeitskarten entwickelt werden. Zur Berechnung des LAI mit Hilfe eines neuen Vegetationsindex wurden von WANG et al. (2007) Sensitivitätsanalysen mittels der STABW und des Cv erfolgreich getestet.

Die Ergebnisse werden als Tabelle in prozentualer Darstellung angegeben. Die Werte müssen aber relativ zum gesamten Schwankungsraum bei Gräsern und Kräutern der relevanten Literatur gesehen werden. Dafür sollten weitere Untersuchungen zur Ermittlung des Wertespektrums der Methoden in der Literatur durchgeführt werden. In dieser Arbeit wird die absolute Variation nicht berücksichtigt. Ebenso sollen Zeitfenster ermittelt werden, in denen die Variationen am stärksten sind. Hierbei können die Messzeitpunkte der Gefäßversuchsreihen von 2007 und 2008 verwendet werden. Diese ermöglichen einen potentiellen Zeitraum für Mess- und Befliegungskampagnen für Fernerkundungsdaten.

4.8 Korrelationsanalyse

Die Korrelation wurde zwischen zwei Datenmengen berechnet, um ihre Ähnlichkeit zu analysieren. Der Korrelationskoeffizient ist ein numerisches Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei zufälligen Variablen. Die Werte bewegen sich zwischen -1 bis 1. Ein hoher positiver Wert bedeutet eine hohe positive Beziehung zwischen den Werten, ein negativer Wert zeigt einen negativen linearen Zusammenhang. Bei 0 zeigen sie keine Abhängigkeit. Es gibt verschiedene Korrelationskoeffizienten. Der Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient (auch Pearson genannt) misst die Beziehung zwischen zwei normal verteilten Variablen. Ein Rangkorrelationskoeffizient ist ein Maß für Korrelationen, ohne das Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variablen vorliegen. Der nicht-parametrische Rangkorrelationskoeffizient ist robust gegenüber Extremwerten und ist auch für nichtlineare Zusammenhänge verwendbar. Während der Spearmans-Rangkorrelationskoeffizient von einer Gleichabständigkeit der Skalenwerte/Ränge ausgeht, basiert Kendall rein auf ordinaler Information (Hartung, et al., 2009).

Bei der Korrelationsanalyse werden 2 Koeffizienten (Pearson, Spearman) angewandt, jeweils aber das relevante Zusammenhangsmaß für die Daten ausgewählt. Als Variablen kommen die Methodenwerte abgeleitet aus den spektrometrischen Labor- und Feldmessungen ($Y = 45$), die Schwermetallgehalte ($Y = 7$), die Nährstoffgehalte ($Y = 2$) und die Chlorophyllgehalte ($Y = 2$) in die Analyse.

Die Interkorrelationen zwischen den jeweiligen Nährelementen, Schwermetallanalysen sowie Pflanzenparametern geben Aufschluss über die Abhängigkeiten zwischen den Werten. Diese Regelmäßigkeiten der Zusammenhänge können somit die Beziehungen zu den Spektralwerten bzw. Ergebnissen der relativen Normierung besser erklären. Ebenso werden die Korrelationen zwischen den Pflanzen und Bodenmerkmalen untersucht. Hierbei können indirekt der Transfer der Elemente in die Pflanze und die Mobilität ermittelt werden.

4.9 Proportionalitätsfaktor

Für die Entwicklung des Algorithmus zur Detektion und Parametrisierung von Schwermetallstress bei Pflanzen stehen Analyse- und Spektraldaten aus dem standardisierten Gefäßversuch im Bereich der morphologischen Einheiten der Aue zur

Verfügung. Dazu wurden Ergebnisse aus der Statistikauswertung und der Korrelationsanalyse in den Prozess übernommen. Im standardisierten Gefäßversuch können eindeutige Abhängigkeiten der Methoden zu dem Parameter Schwermetall aufgezeigt werden. Im Feld trifft dies nur noch bedingt zu, so dass eine Veränderung bzw. Erhöhung des Einfluss des Faktors bzw. anderer Faktoren eintritt. In der Stufe des Verfahrens wird die spezielle Abhängigkeit zu dem einzelnen Parameter in ein Verhältnis gesetzt. Dabei wird getestet, ob die Methoden für eine allgemeine Veränderung des Zustands der Pflanze (Multikorrelation mit gleichrangigen Faktoren) geeignet sind oder ob einzelne Parameter (Multikorrelation mit einem vorrangigen Faktor) bestimmt werden können. Die höchsten Korrelationen kommen in die weitere Entwicklungsstufe, wo sie in ein Verhältnis der Korrelationskoeffizienten von Methodenwert und Schwermetallgehalt bzw. zum Mittel von Chlorophyll- und Nährstoffgehalten gesetzt werden (Proportionalitätsfaktor P) (Kammermeyer, et al., 2000) (Abbildung 4.7). Damit kann die Methode, die am eindeutigsten die Abhängigkeit zu den Schwermetallen aufzeigt, bestimmt werden. Die Korrelationen werden als Absolutwerte verrechnet, da die Stärke der Korrelation entscheidend ist. Es wurde die Formel P_{SM} für Schwermetallabhängigkeit, P_{CHL} für Chlorophyllabhängigkeit und P_{NS} für Nährstoffabhängigkeit entwickelt:

Formel 4.8: Proportionalitätsfaktor für Schwermetalle.

$$P_{SM} = \left| \frac{X_{RS}}{\frac{X_{RN} + X_{RC}}{2}} \right|$$

Formel 4.9: Proportionalitätsfaktor für Chlorophyll.

$$P_{CHL} = \left| \frac{X_{RC}}{\frac{X_{RS} + X_{RN}}{2}} \right|$$

Formel 4.10: Proportionalitätsfaktor für Nährstoffe.

$$P_{NS} = \left| \frac{X_{RN}}{\frac{X_{RS} + X_{RC}}{2}} \right|$$

PSM	=	Proportionalitätsfaktor Schwermetall
PSM	=	Proportionalitätsfaktor Chlorophyll
PNS	=	Proportionalitätsfaktor Nährstoff
XRS	=	Korrelationskoeffizient Schwermetallgehalt und Methode
XRN	=	Korrelationskoeffizient Nährstoffgehalt und Methode
XRC	=	Korrelationskoeffizient Chlorophyllgehalt und Methode

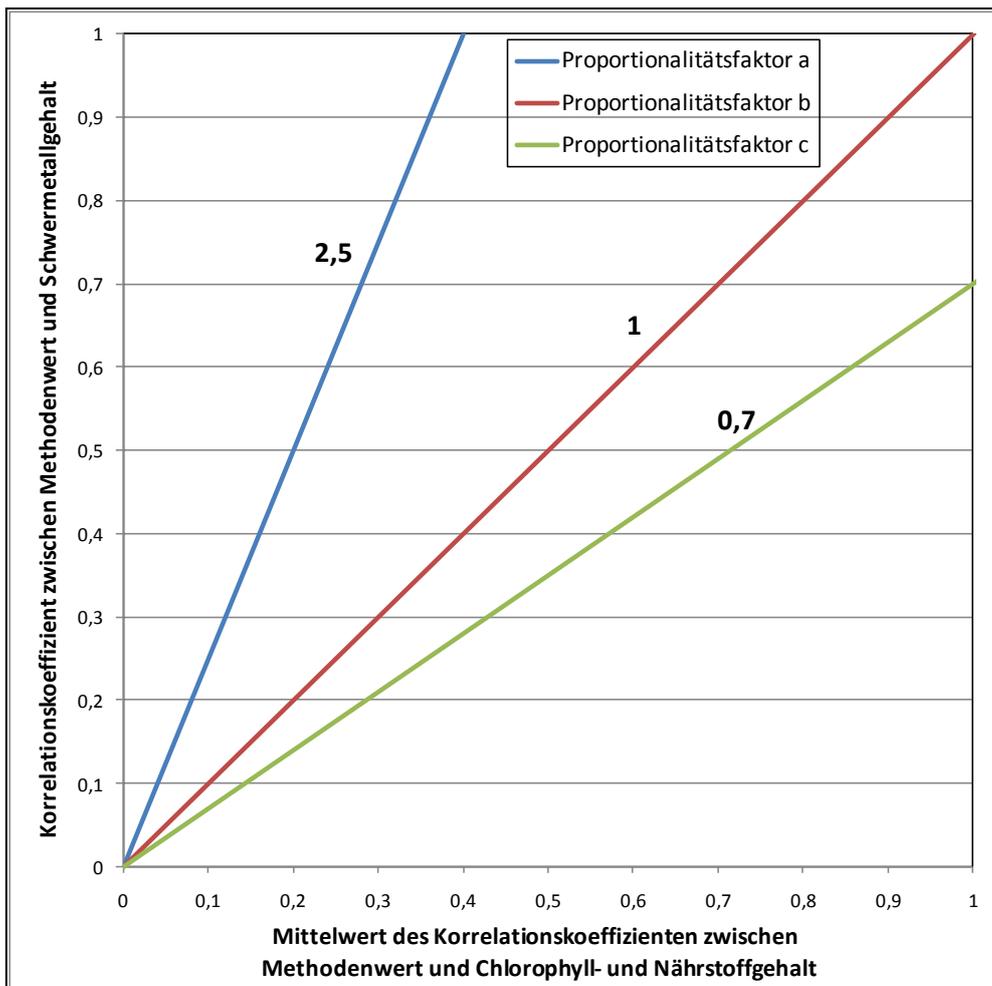


Abbildung 4.7: Grafische Darstellung verschiedener Proportionalitätsfaktoren (modellhaft) zwischen den Korrelationskoeffizienten Schwermetallgehalt und Mittel aus Chlorophyll- und Nährstoffgehalt.

4.10 Übertragung auf Fernerkundungsdaten

Die ermittelten Methoden (hoher Proportionalitätsfaktor) des entwickelten Algorithmus werden auf die flächenhaften Fernerkundungsdaten der Arbeit (HyMap, AISA Eagle) übertragen und getestet. Die gemessenen Feld- und Laborspektren werden als Zwischenstufe von 1 nm Spektralbreite mit über 2000 Bändern auf die Spektralbreite und Kanalanzahl der verwendeten Fernerkundungsdaten simuliert (*Spectral Library Resampling*). Dabei werden die Bänder im jeweiligen Spektralbereich gemittelt und ihre Anwendbarkeit auf die Fernerkundungsdaten mit unterschiedlicher spektraler Breite untersucht. Es erfolgt die Anwendung des Algorithmus mittels *Spectral Math*, einem ENVI 4.4-Tool zur Nutzung von mathematischen Termini bei Spektren. Ebenso wurde bei einigen Methoden die Funktion *Continuum Removal* angewandt. Sie normalisiert das Reflexionsspektrum, so dass Absorptionsbanden verschiedener Spektren an einer einheitlichen Basislinie verglichen werden können (siehe Abschnitt 1.3.6 Methoden der Fernerkundung zur Stressdetektion). Das Originalspektrum wird durch die angepasste Kontinuumkurve dividiert (Clark, et al., 1987)(Formel 4.11).

Formel 4.11: Formel zur Berechnung der Tiefe der Bande innerhalb des Kontinuumbereichs (Clark, et al., 1987).

$$S_{CR} = \frac{S}{C}$$

SCR = kontinuum-bereinigtes Spektrum

S = Originalspektrum

C = Kontinuumkurve

Bei erfolgreicher Anwendung des Verfahrens an den simulierten Spektren wird die Anwendbarkeit bei den vorhandenen Sensordaten getestet, um Empfehlungen für die Übertragbarkeit zu geben und bestehende Einschränkungen durch den Wegfall bestimmter Spektralbereiche/-banden aufzuzeigen. Dabei wird die *Band Math* (wie *Spectral Math*, aber für räumliche Bilddaten)- sowie die *Continuum Removal*-Funktion durchgeführt (Abbildung 4.8).

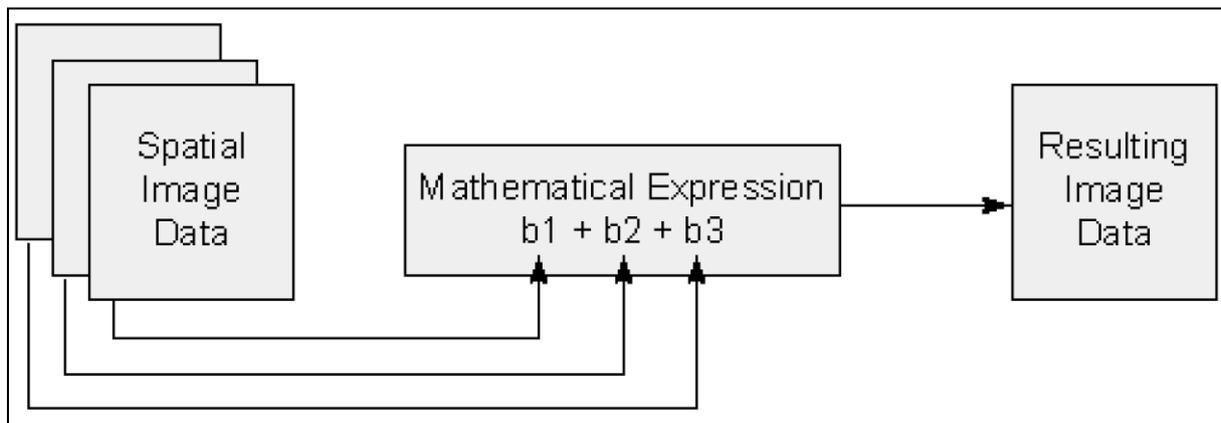


Abbildung 4.8: Funktionsweise der *Band Math*-Funktion (ENVI User's Guide).

Das Ergebnis ist ein Grauwertbild, das mit Hilfe eines Schwellenwertstufenverfahrens (*Density Slice*) der Software ENVI 4.4 in 6 Klassen aufgeteilt wird. Die Schwellenwertverfahren ordnen die Pixel von Bildern Segmenten zu (pixelorientiertes Segmentierungsverfahren) (Formel 4.12). Die Zugehörigkeit eines Pixels wird durch den Vergleich des Grauwerts mit dem Schwellenwert entschieden (Jähne, 2002). Danach erfolgt die Merkmalsextraktion (Farbgebung) und die Klassifizierung (Name). Die Festlegung der Klassen erfolgt über die Abhängigkeit zwischen dem Methodenwert und den Schwermetallgrenzwerten der Futtermittelschutzverordnung (FMVO, 2000) (siehe Abschnitt 5.6 Ergebnisse der Übertragung auf flächenhafte Daten“).

Formel 4.12: Formel zur Berechnung eines globalen Schwellenwertverfahrens (ENVI User's Guide).

$$T_n(g) = \begin{cases} 0 & \text{falls } g < t_1 \\ 1 & \text{falls } t_1 \leq g < t_2 \\ \vdots & \\ n & \text{falls } g \geq t_n - 1 \end{cases}$$

T = globales Schwellenwertverfahren
n = Segmente
t = Schwellenwert
g = Grauwert

Das klassifizierte Bild wird durch eine Binärmaske überlagert, d.h. nur die Vegetationsbereiche der Aue werden nicht maskiert, um so die Informationen zu fokussieren. Dabei wird das Ergebnisbild mittels Multiplikation mit 0 und 1 in Bereiche mit keinen und relevanten Daten getrennt (Lillesand, et al., 2008). Die Binärmaske wird mittels der Biotoypennutzungskartierung erstellt (siehe Klassenbeschreibung 2.1 Auswahl des Untersuchungsgebiets). Als letzter Schritt werden die Rasterdaten in ein Geoinformationssystem (ArcMap 9.3) übertragen und mit Vektorlayern überlagert. Danach folgt ein Export als 2D-Karte.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Analyseergebnisse

5.1.1 Gefäßversuchsreihen

Der standardisierte Gefäßversuch untersucht die Unterschiede zwischen den Kontaminationsgraden der Böden und den phänologischen Veränderungen innerhalb und zwischen den Arten. Die Mess- und Erntezeitpunkte für das Jahr 2008 zeigt exemplarisch die Abbildung 5.1. Diese liegen in der Vegetationsperiode der Auenpflanzen zwischen April und September für das Jahr 2007 und 2008. Dabei sind die pflanzenphysiologisch prägnanten Zeitpunkte wie Wachstums- und Reifephase abgedeckt.

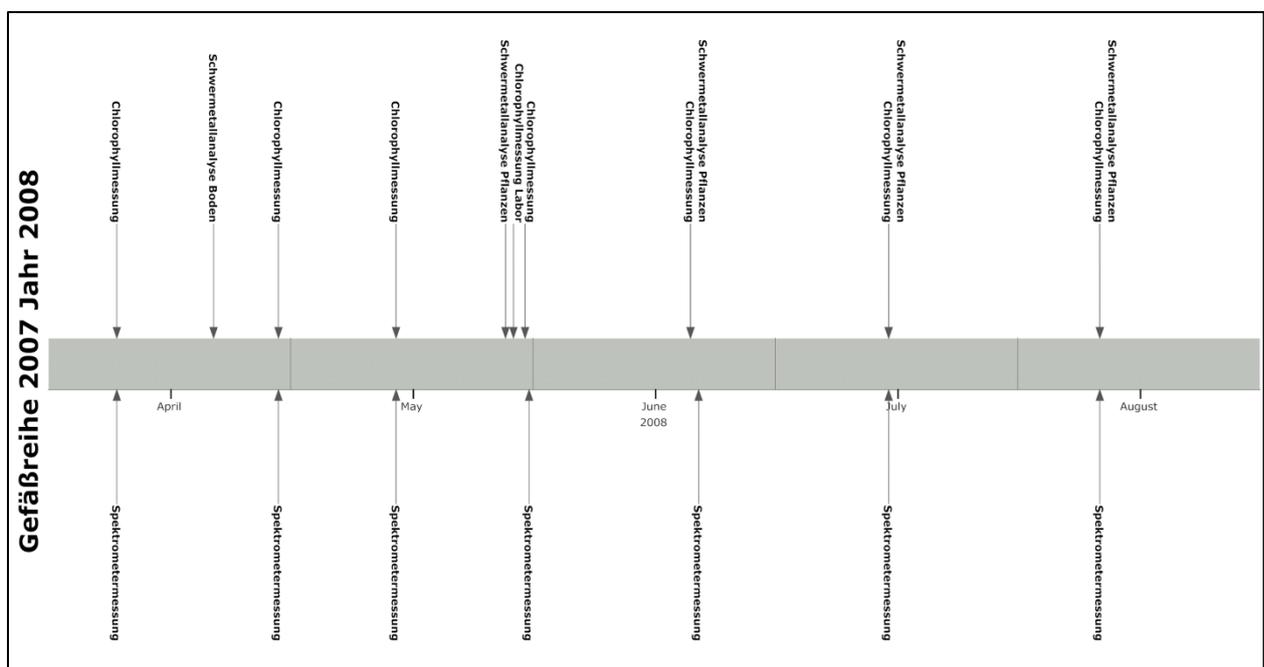


Abbildung 5.1: Mess- und Erntezeitpunkte für die Gefäßreihe 2007 im Jahr 2008.

Die untersuchten Parameter sind Chlorophyll (Labor/photospektrometrisch, Feld/optische Dichte-Differenz), Schwermetalle (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb) und Pflanzennährstoffe (P, K). Die Wassersättigung sowie die Düngung des Bodens in den Gefäßen wurden konstant gehalten. Im Gefäßversuch kann gezielt nach signifikanten Beziehungen zwischen dem spektralen Verhalten und den Kontaminationsgraden gesucht werden. Die Darstellungen wurden jeweils nach Jahren (Gefäßversuch 2007 im Jahr 2007, Gefäßversuch 2007 im Jahr 2008 und Gefäßversuch 2008 im Jahr 2008) zusammengefasst, um eine Vegetationsperiode aufzeigen zu können.

5.1.1.1 Schwermetall- und Nährstoffanalysen des Bodenmaterials

Am Anfang jeder Meßreihe wurden die Ausgangskontaminationen sowie die Nährstoffgehalte für das Bodenmaterial der Gefäße ermittelt. Diese zeigen die Belastungssituation vor Ort in den 3 großen morphologischen Einheiten der Aue (Niederterrasse, Hochfläche, Rinne). Die Gefäßreihe von 2007 zeigt diese in Form von

Gefäßtyp A (Niederterrasse), B (Hochfläche) und C (Rinne). Dabei sind die Gefäße von Typ B im Bereich der Schwermetallgehalte deutlich geringer als Typ A und C und auch unter den Grenzwerten der BBodSchV (1999) (Abbildung 5.2). Es werden bei Typ A und C die Maßnahmenwerte der BBodSchV (1999) für As und Hg sowie die Vorsorgewerte Cd, Cr, Cu und Pb überschritten. Aber auch die Nährstoffbedingungen sind gegenüber den Typen A (7000 ppm) und C (4500 ppm) in geringerem Maße repräsentiert (2000 ppm) (Abbildung 5.3).

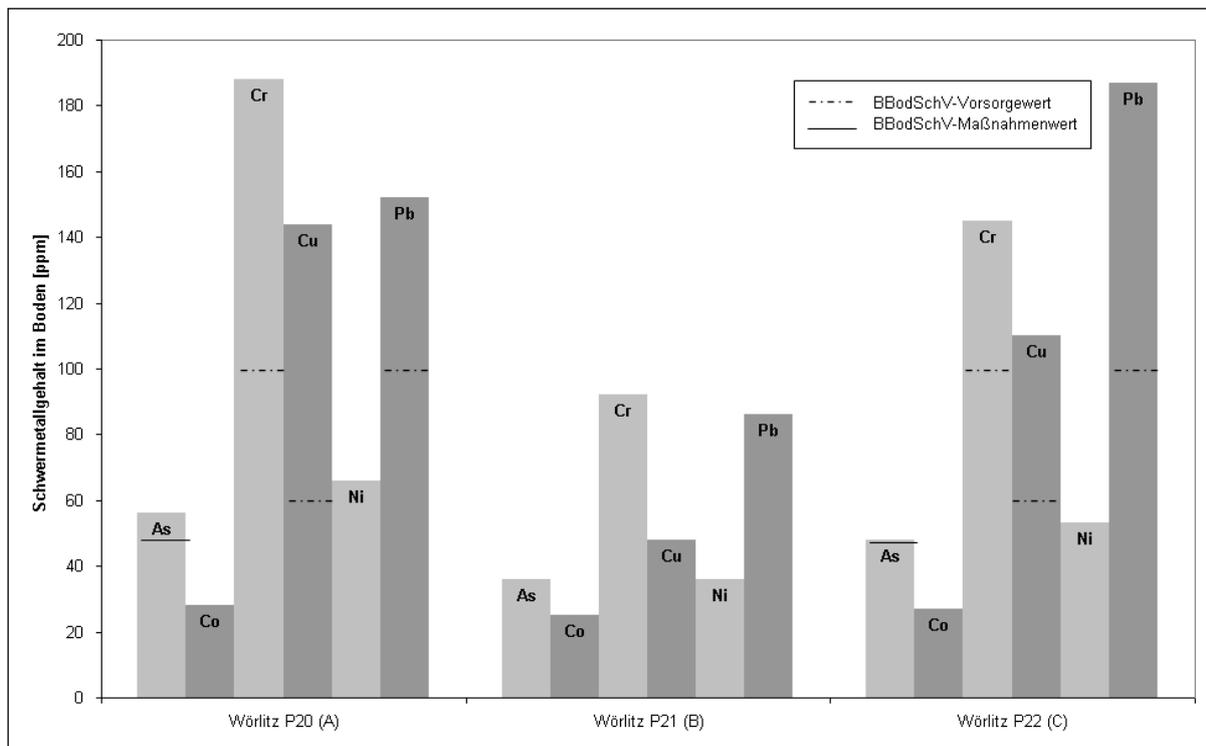


Abbildung 5.2: Schwermetallgehalte [mg/kg] der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 (Typ A, B und C) sowie deren Grenzwerte der BBodSchV - Teil 1.

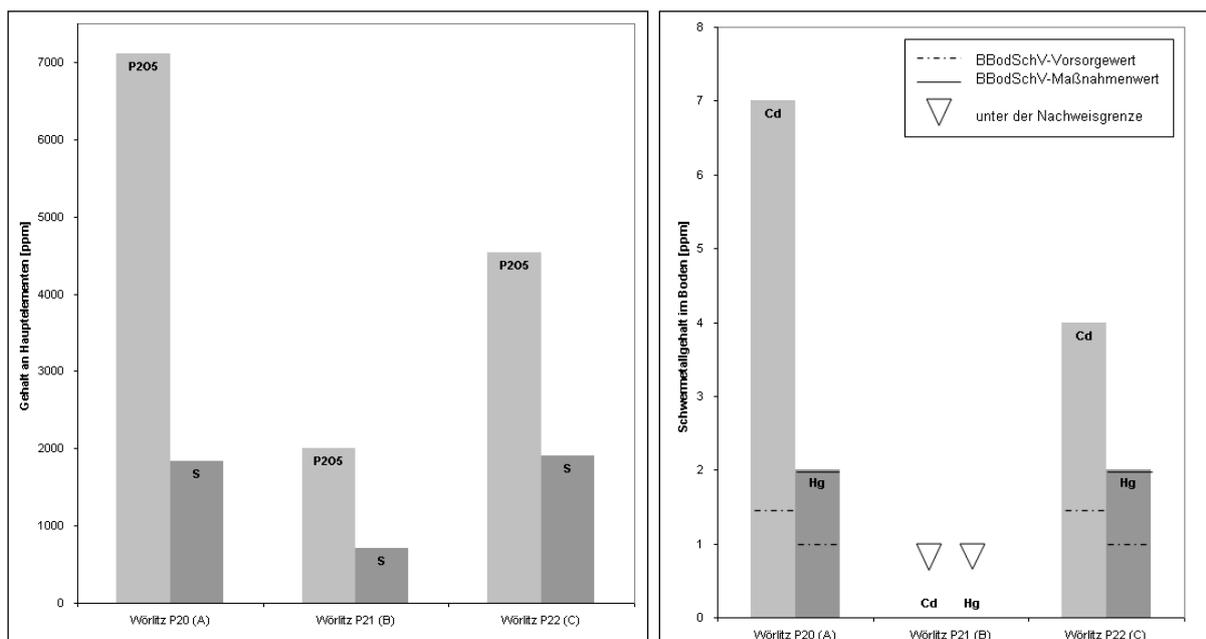


Abbildung 5.3: Nährstoff- und Schwermetallgehalte [mg/kg] der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 (Typ A, B und C) sowie deren Grenzwerte der BBodSchV - Teil 2.

Bei der Gefäßreihe von 2008 zeigten sich der Typ BR (Breitenhagen, Saalemündung) sowie WÖNT (Niederterrasse) als stark mit Schwermetallen belastet, die WÖHF (Hochfläche) dagegen besitzt eine niedrige bis mittlere Belastung (Abbildung Anh. 8, Abbildung Anh. 9, Abbildung Anh. 10, Abbildung Anh. 11). Die eigentliche Kontrollfläche WöKo (ca. 200 m Entfernung zum Fluss) überschreitet ebenso einige Grenzwerte der BBodSchV. Trotz der Lage sind die Ausmaße der letzten Hochwässer so stark, dass auch weiterliegende Gebiete von der Sedimentation mit Schwermetallen betroffen sind. Diese ermittelten Daten lassen sich in Bezug auf die Kontaminationsgrade der morphologischen Einheiten in den Rahmen der Untersuchungen (Rinklebe, et al., 2006) vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Halle einordnen. Durchgeführt wurden alle Schwermetallanalysen von der Analytik des Instituts in Leipzig mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS).

5.1.1.2 Schwermetallanalysen Pflanzen

Die Pflanzenanalysen im Bereich der Schwermetalle weisen geringere Werte als der Boden auf. Im Regelfall liegen Schwermetallgehalte deutlich tiefer in Pflanzenteilen als im Boden (Overesch, 2002). Dabei werden die verschiedenen Pflanzenteile unterschiedlich stark akkumuliert. Die Blätter haben oft den geringsten Anteil an Belastung. Sie sind aber entscheidend für das Spektralsignal mittels Fernerkundungsdaten. Auch wenn einige Messungen nicht so hohe Werte aufweisen, liegt häufig im Gesamtmedium der Pflanze eine deutlich höhere Belastung vor (Baroni, et al., 2004).

Es zeigt sich bei den Schwermetallgehalten im Schnitt eine mittlere bis hohe Belastung der Gefäßreihen 2007 und 2008 (Tabelle Anh. 3). In der Gefäßreihe von 2007 findet sich eine zunehmende Belastung der Pflanze im Mittel vom Beginn des Ansetzens (März 2007) bis September 2008, da die Pflanze immer mehr aus dem Boden akkumuliert (Abbildung Anh. 12, Abbildung Anh. 13). Während bei Arsen und Blei die Maxima die FMVO-Grenzwerte überschreiten, ist bei Cadmium der Mittelwert über dem Maßnahmenwert (Tabelle 5.3). Für alle anderen Elemente werden keine Grenzwerte in der FMVO (FMVO, 2000) beschrieben. Durch den Variationskoeffizient werden auch die stärkeren Schwankungen der Schwermetallgehalte gegenüber den Nährstoff- und Chlorophyllgehalten verdeutlicht. Begründet ist dies durch eine höhere Zahl an Ausreißern bei den Schwermetallelementen. Da die Phosphatvariation durch die einheitliche Düngung abgeschwächt sowie die nicht-destruktive Messmethode des relativen Chlorophyllgehalts eine geringe Zahl von Fehlerquellen hat, finden sich geringere Cv-Werte. Weitere Angaben zur Deskriptiven Statistik der Gefäßreihe 2007 und 2008 im Jahr 2008 zeigt die Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2.

Tabelle 5.1: Deskriptive Statistik der Gefäßreihe 2007 im Jahr 2008.

Element	N gesamt	Mittelwert	Standard- abweichung	SE des Mittelwerts	Varianz	Summe	Variations- koeffizient	Geometrischer Mittelwert	Minimum	Median	Maximum
As	41	0,78	0,61	0,10	0,37	31,97	0,78	0,57	0,06	0,60	2,50
Cd	29	2,24	2,70	0,50	7,28	64,94	1,21	–	0,00	0,92	10,30
Cr	40	1,24	0,89	0,14	0,78	49,68	0,71	0,99	0,31	0,97	3,50
Cu	41	10,28	8,72	1,36	76,08	421,48	0,85	7,70	2,38	5,60	37,00
Ni	44	2,97	2,68	0,40	7,19	130,65	0,90	2,11	0,50	2,05	12,80
P	45	2530,96	646,28	96,34	417675,32	113893,00	0,26	2435,57	637,00	2465,00	3839,00
Pb	45	1,45	1,56	0,23	2,43	65,43	1,07	1,02	0,11	0,90	8,00
SPAD	81	27,80	7,10	0,79	50,46	2252,20	0,26	26,87	11,90	28,10	45,80
Zn	45	73,62	53,26	7,94	2836,33	3312,84	0,72	56,11	16,33	49,00	196,00

Tabelle 5.2: Deskriptive Statistik der Gefäßreihe 2008 im Jahr 2008.

Element	N gesamt	Mittelwert	Standard- abweichung	SE des Mittelwerts	Varianz	Summe	Variations- koeffizient	Geometrischer Mittelwert	Minimum	Median	Maximum
As	55	1,24	1,69	0,23	2,86	68,31	1,36	0,74	0,08	0,62	8,30
Cd	44	0,79	0,95	0,14	0,91	34,62	1,21	0,37	0,04	0,36	3,90
Cr	56	2,85	4,20	0,56	17,61	159,60	1,47	1,64	0,25	1,47	23,40
Cu	61	9,45	6,35	0,81	40,26	576,70	0,67	8,10	3,90	7,30	34,00
K	64	22407,17	7022,77	877,85	49319200,00	1434060,00	0,31	21422,34	12053,00	20829,50	39901,00
Ni	64	2,42	1,97	0,25	3,88	154,92	0,81	1,89	0,60	1,74	9,80
P	64	3360,56	833,93	104,24	695442,88	215076,00	0,25	3263,82	2057,00	3246,50	5293,00
Pb	64	2,98	6,49	0,81	42,13	190,52	2,18	1,36	0,29	1,16	45,00
Zn	64	122,87	97,92	12,24	9587,86	7863,67	0,80	90,30	23,97	68,45	411,90
SPAD	64	23,73	6,85	0,86	46,92	1518,60	0,29	22,12	2,60	24,50	33,40

Tabelle 5.3: Grenzwerte der Futtermittelschutzverordnung (FMVO).

Schwermetall	FMVO-Grenzwert (mg/kg)
As	2
Pb	10
Cd	1

Die Daten werden als Box-Plot-Diagramme und als Histogramme dargestellt.

Der Median der Schwermetallwerte liegt innerhalb der Box links bis stark links, so dass eine rechtsschiefe Verteilung der Daten vorliegt. Ebenso sind die Boxplots unsymmetrisch, was auf eine nicht normalverteilte Grundgesamtheit schließen lässt (Abbildung Anh. 16). Am Beispiel von Pb und Cu in der Gefäßreihe 2007 im Jahr 2008 wird dies in Abbildung 5.4 dargestellt.

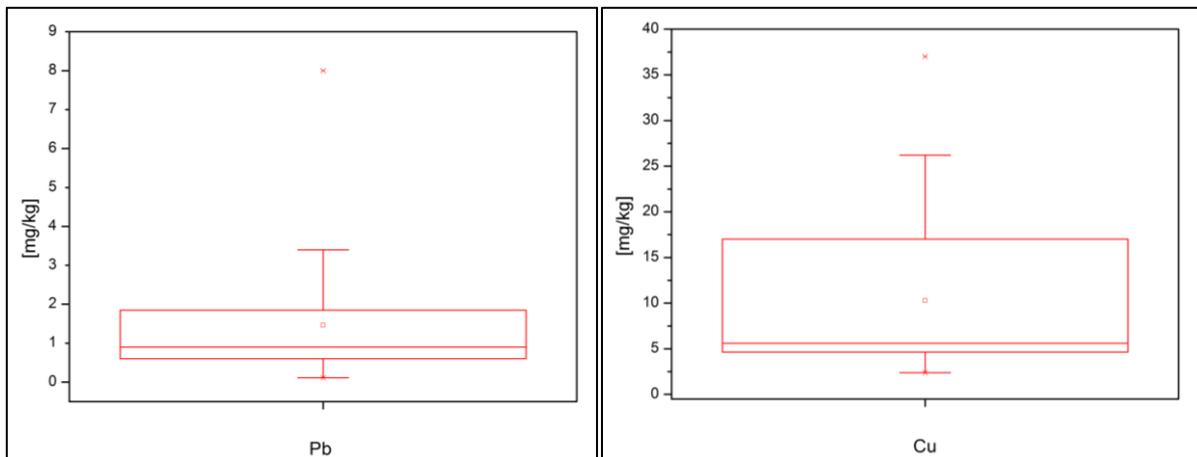


Abbildung 5.4: Boxplot von Blei [mg/kg] (links) und Cu [mg/kg] (rechts) der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

Da die Korrelationskoeffizienten Pearson und Spearman alle für die metrischen Daten gelten, ist die Normalverteilung ein weiteres Merkmal zur Wahl der richtigen Methode. Deshalb wird ein Normalverteilungstest vor der Korrelationsanalyse durchgeführt. Die Normalverteilung der Schwermetallgehaltswerte sind bei einem Niveau von 0,05 bei As, Cd, Ni, Zn signifikant und bei Cr, Cu, Pb nicht signifikant aus einer normalverteilten Grundgesamtheit gezogen worden (Abbildung Anh. 17, Tabelle Anh. 4). Diese Angaben beziehen sich nur auf den Kolmogorov-Smirnov-Test. Bei dem Shapiro-Wilk- und Lilliefors-Test konnten keine normalverteilten Daten ermittelt werden. Die Tabelle 5.4 beschreibt die Anzahl der Freiheitsgrade (DF), die Teststatistik und den P-Wert (Überschreitungswahrscheinlichkeit) des durchgeführten Kolmogorov-Smirnov-Tests. Bei der

Gefäßreihe 2008 im Jahr 2008 konnten keine normverteilten Daten ermittelt werden (Abbildung 5.5).

Tabelle 5.4: Kolmogorov-Smirnov-Test für die Gefäßreihe 2007 im Jahr 2008.

Kolmogorov-Smirnov			
Element	DF	Statistik	p-Wert
As	41	0,18447	0,10781
Cu	41	0,27717	0,00282
Pb	45	0,20968	0,03256
Ni	44	0,19213	0,06754
Cr	40	0,2234	0,03102
Zn	45	0,19156	0,06398
Cd	29	0,21526	0,11689

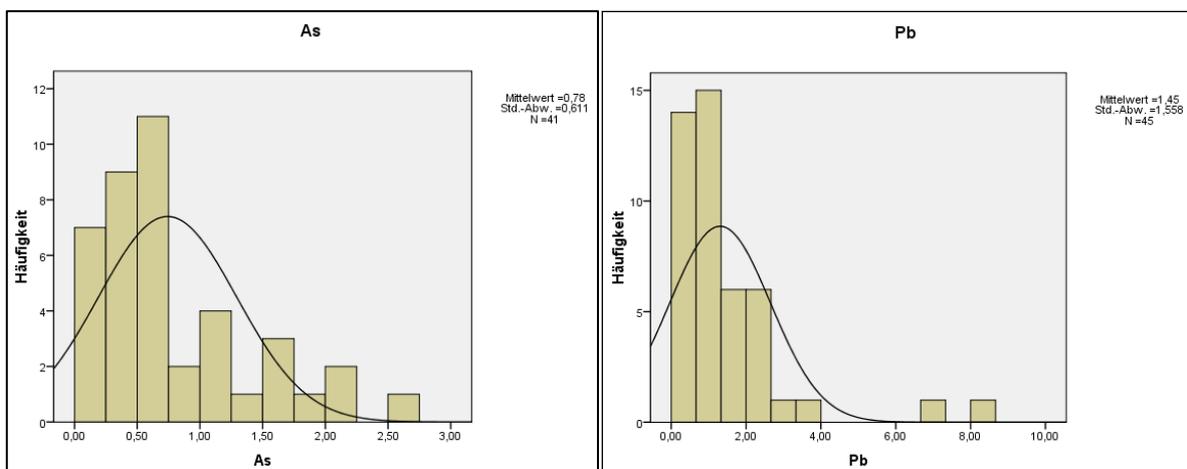


Abbildung 5.5: Histogramm für As [mg/kg] (links) und Pb [mg/kg] (rechts) der Gefäßversuchsreihe 2008 im Jahr 2008 mit Normalverteilungskurve.

Bei näherer Betrachtung sind die Ergebnisse nicht nur für die einzelnen Standorte sondern auch nach Pflanzenart zu unterscheiden. Die Variationen in den Kontaminationsgraden der Böden zeigten sich nicht so stark. Während der Standort C höhere SM-Werte aufweist, ist die Differenz zwischen Standort A und B gering. Einige Schwermetalle wie As und Zn verhalten sich in Bezug auf die Ausgangskontamination im Boden regelmäßig, während bei Cu und Pb sich diese nicht darstellt (Abbildung 5.6). Die Gefäßreihe 2008 bestätigt die Ausgangskontamination der Bodentypen bei den Elementgehalten der Pflanzen (Abbildung 5.7). Im Gesamtschwermetallgehalt der Pflanze kann eine Rangfolge festgelegt werden von niedriger zu hoher Belastung (Gefäßreihe 2007 $B < A < C$; Gefäßreihe 2008 $WöKf < WöHf < WöNt < Br$) (Abbildung Anh. 20, Abbildung Anh. 22, Abbildung Anh. 23, Abbildung Anh. 26). Ebenso wird bei den Gräsern und Kräutern eine Ungleichheit der aufgenommenen Schwermetalle sichtbar. Die Kräuter haben im Mittel 2 bis 3mal so hohe Gehalte wie die Gräser. Die Hauptgründe hierfür können die artenspezifischen Unterschiede wie die Speicherorgane oder der Aufbau der Pflanze sein.

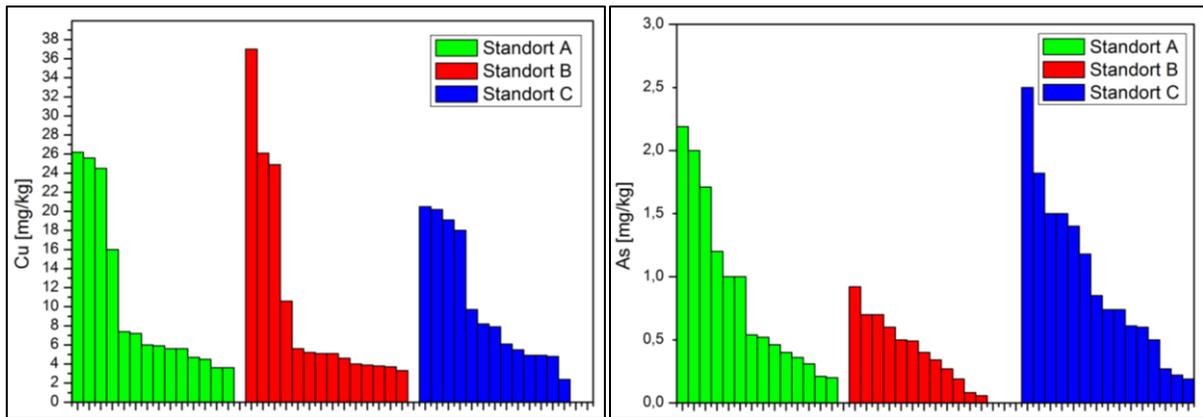


Abbildung 5.6: Schwermetallgehalt Cu [mg/kg] (links) und As [mg/kg] (rechts) der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 (Probenwerte sortiert).

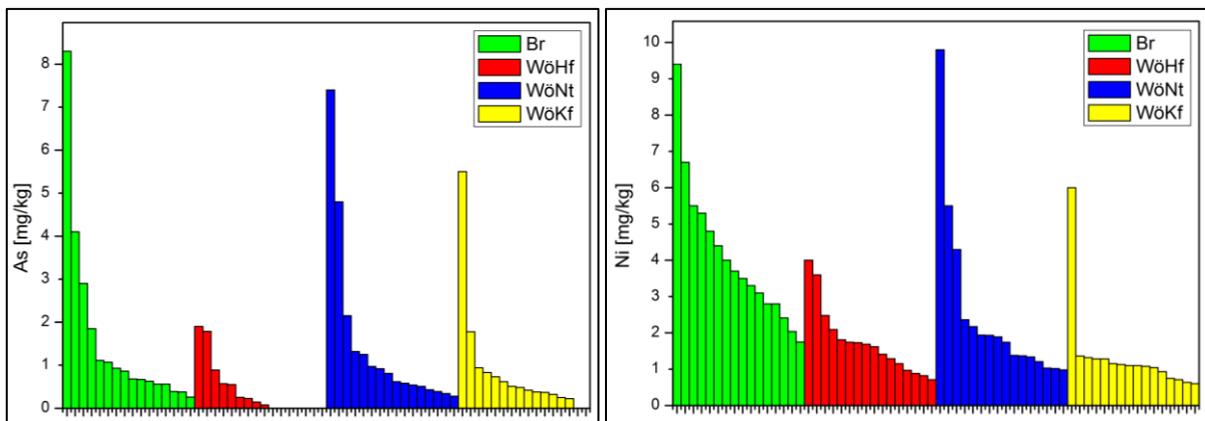


Abbildung 5.7: Schwermetallgehalt As [mg/kg] (links) und Ni [mg/kg] (rechts) der Gefäßversuchsreihe 2008 im Jahr 2008 (Probenwerte sortiert).

5.1.1.3 Chlorophyllmessungen Pflanzen

Um den Chlorophyllgehalt im Blatt zu bestimmen, muss dieser mit Hilfe von Methanol extrahiert und anschließend photometrisch bestimmt werden. Da diese Methode sehr zeitaufwendig und destruktiv ist, wurde mittels des oft in der Literatur (Schlemmer, et al., 2005; Li, et al., 2008) verbreiteten Chlorophyllmessgerätes Minolta SPAD-502 der relative Chlorophyllgehalt bestimmt. MARKWELL et al. (1995) sowie UDDLING et al. (2007) beschreiben eine hohe positive Abhängigkeit zwischen den Werten des Messgerätes und der photospektrometrischen Labormethode. Es zeigt sich in den eigenen Untersuchungen ein positiver Zusammenhang von $R^2 = 0,961$ bei Brennnessel für das Jahr 2007 (Abbildung 5.8).

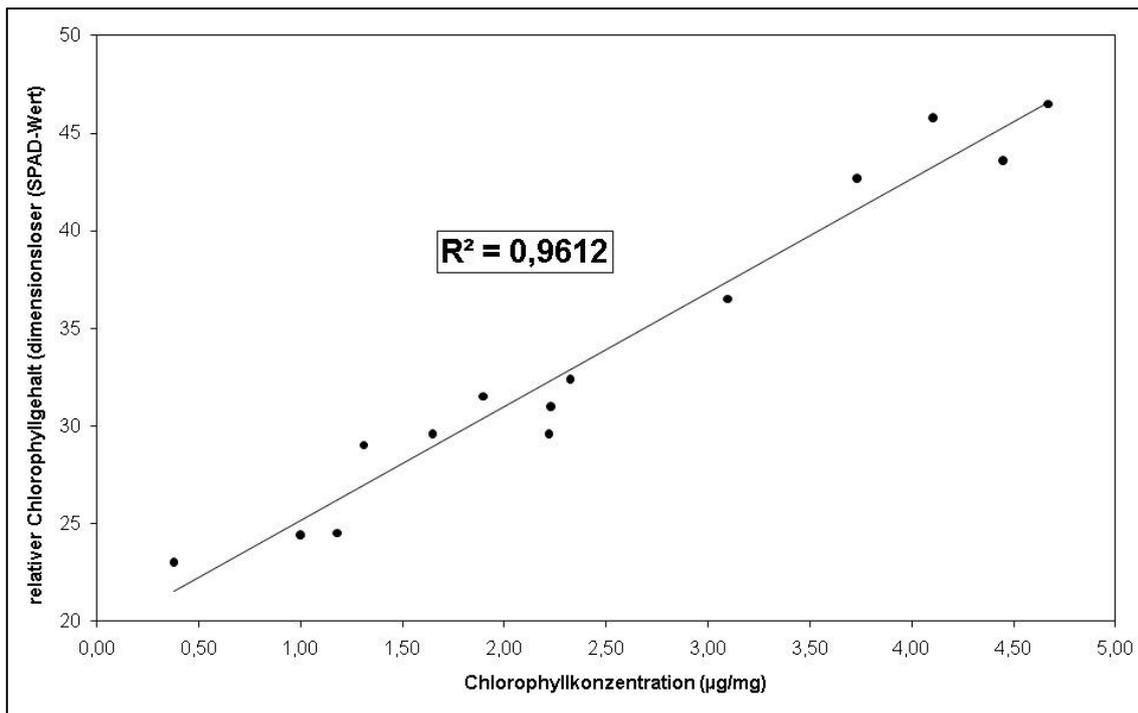


Abbildung 5.8: Beziehung zwischen laborphotospektrometrisch gemessener Chlorophyllkonzentration [$\mu\text{g}/\text{mg}$] und dem im Feld gemessenen relativen Chlorophyllgehalt (Minolta SPAD-502) von Brennesselpflanzen aus dem Gefäßversuch im Jahr 2007.

Im Verlauf des Jahres 2007 sowie 2008 zeigt sich bei beiden Gefäßreihen eine kontinuierliche Abnahme des Chlorophyllgehalts im Mittel von ca. 35 zu 18 (SPAD-Wert). Bei einer 1:1 Umrechnung auf die Chlorophyllkonzentration ist das eine Veränderung von ca. 3,7 zu 0 $\mu\text{g}/\text{mg}$. Insbesondere am Anfang durch die unterschiedlichen Arten sowie die Anwuchszeiten und am Ende durch die verschiedenen Reifepunkte der Arten kommt es zu stärkeren Schwankungen (Abbildung 5.9).

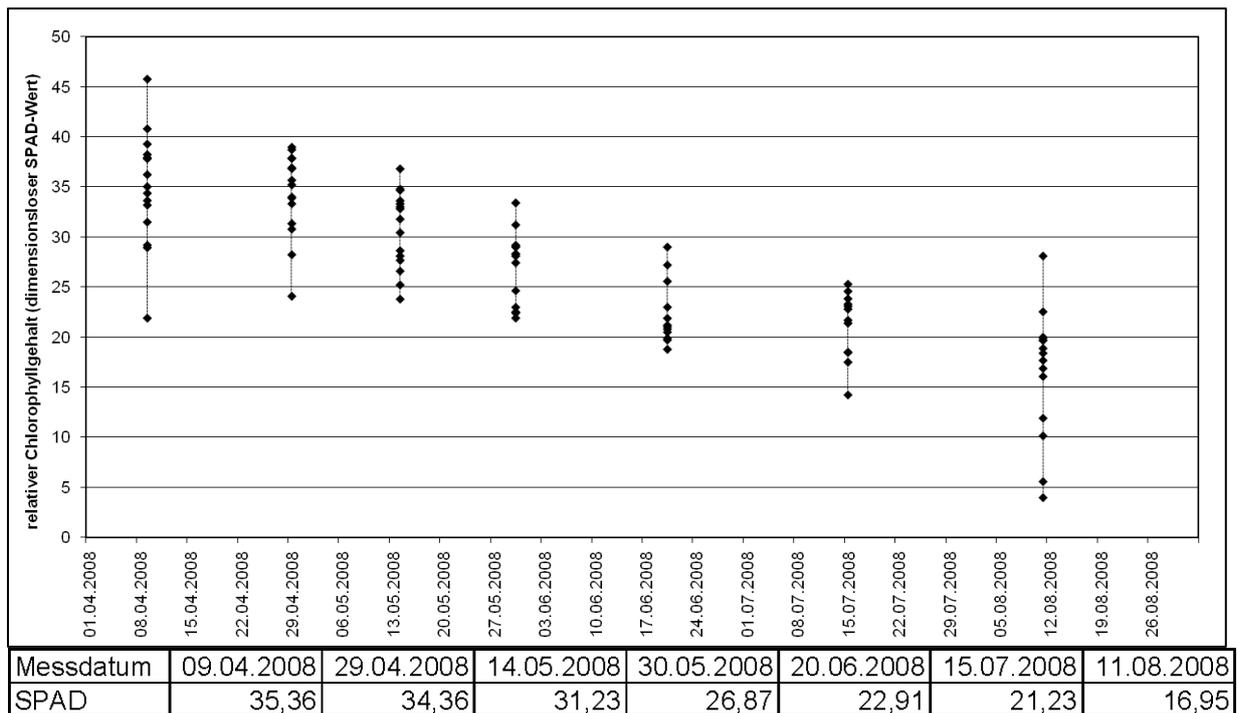


Abbildung 5.9: Relativer Chlorophyllgehalt (SPAD-Wert) in der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 (und tabellarische Mittelwerte).

Das Boxplot des relativen Chlorophyllgehalts (SPAD) zeigt eine symmetrische Verteilung der Daten mit einem mittig liegenden Median (Abbildung 5.10, Abbildung Anh. 15, Abbildung Anh. 19, Abbildung Anh. 21, Abbildung Anh. 25, Abbildung Anh. 28). Der Normalverteilungstest weist bei allen drei Methoden eine signifikante Normalverteilung auf (Tabelle 5.5). Diese Aussage lässt sich für alle Gefäßreihen treffen. Die Verteilung ist durch den typischen phänologischen Verlauf mit anfangs zunehmenden Chlorophyllgehalten in der Wachstumsphase und dann später abnehmenden in der Reifephase geprägt.

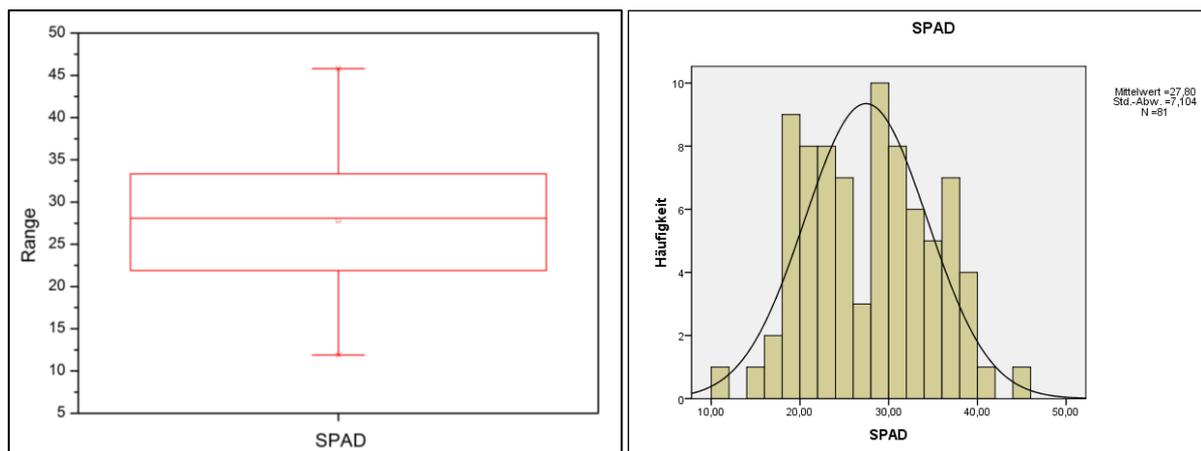


Abbildung 5.10: Boxplot für den relativen Chlorophyllgehalt (SPAD-Wert) der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 (links) und Histogramm für den relativen Chlorophyllgehalt (SPAD-Wert) der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 mit Normalverteilungskurve (rechts).

Tabelle 5.5: Normalverteilungstest für den relativen Chlorophyllgehalt (SPAD-Wert) der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008

Test		DF	Statistik	Prob>D
Shapiro-Wilk	SPAD	81	0,9803	0,24693
Lilliefors	SPAD	81	0,08269	0,18712
Kolmogorov-Smirnov	SPAD	81	0,08269	0,62597

Die Gefäßproben mit den höher kontaminierten Böden (A und C) haben im Mittel zu den Zeitpunkten auch höhere Chlorophyllgehalte. Entgegen der allgemeinen Annahme, dass die Pflanzen mit geringer belasteten Böden (B) eine höhere Vitalität aufweisen, konnte im Versuch nicht bestätigt werden (Abbildung 5.11). Als mögliche Ursache könnten die Nährstoffbedingungen der Böden gelten, wie auch Clevers et al. (2004) am Rhein in ihren Untersuchungen feststellen konnten. Die tiefer gelegenen Bereiche besitzen durch die bessere Wasserversorgung auch eine höhere Nährstoffzufuhr (siehe Abschnitt 5.1.1.4 Nährstoffanalysen Pflanzen“). Diese natürliche Grundbelastung wurde in den Versuch mit übernommen. Dies zeigte sich ebenso in der Gefäßreihe 2008 im Jahr 2008. Hierbei besitzen die stark bis sehr stark belasteten Standorte Br und WöNt höhere Chlorophyllgehalte. Dagegen weisen die Chlorophyllgehalte beim WöNt-Bodentyp in Bezug auf die Maximalwerte ca. 6 SPAD-Einheiten im Jahresverlauf weniger auf.

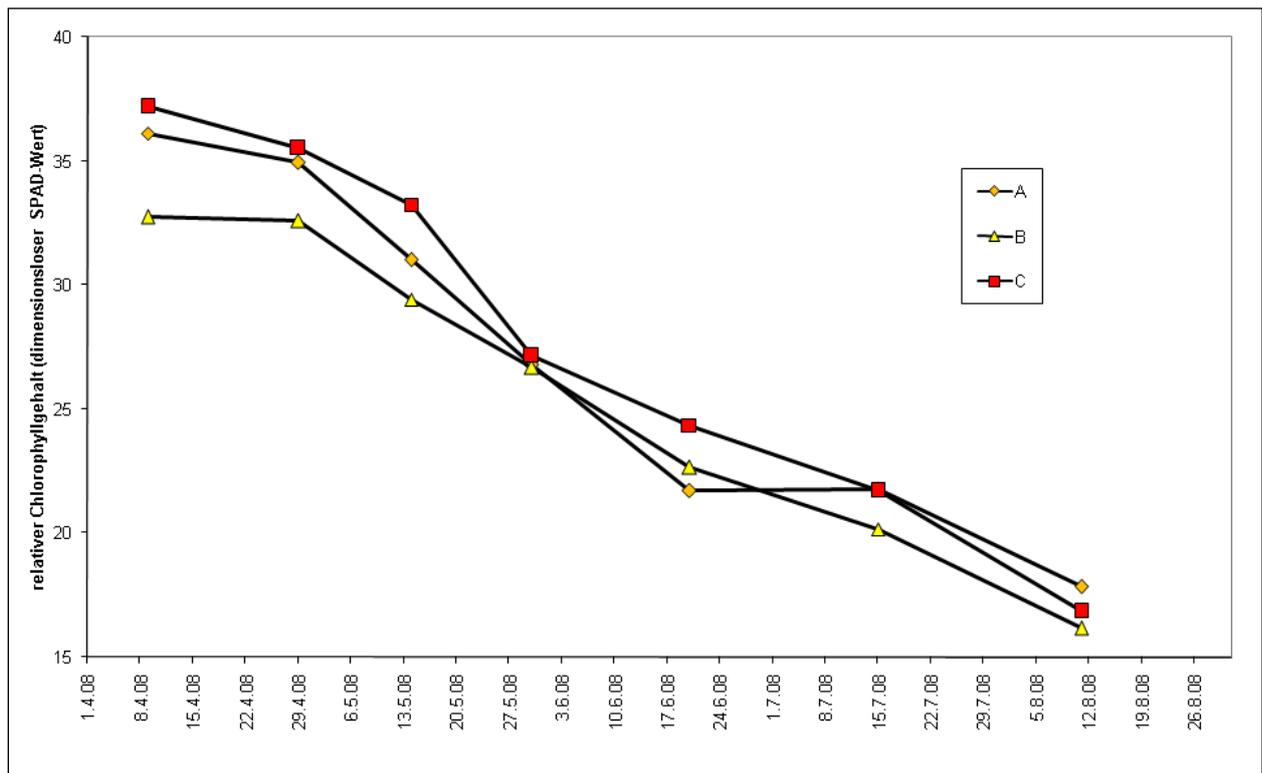


Abbildung 5.11: Verteilung des relativen Chlorophyllgehalts der Pflanzen der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

5.1.1.4 Nährstoffanalysen Pflanzen

Um eine Nährstoffbilanz der einzelnen Gefäßreihen ziehen zu können, wurden P und K bestimmt. In der Gefäßreihe 2007 wurde 2008 eine unterschiedliche Grundbelastung zwischen den Standorten festgestellt (Abbildung Anh. 14, Abbildung Anh. 18, Abbildung Anh. 24,

Abbildung Anh. 27). Diese Abweichung spiegelt sich in geringerem Ausmaß ebenso in den Pflanzenproben wieder. Hierbei zeigt sich der Standort B (Hochfläche) mit einem P-Gehalt von 2425,47 ppm geringer belastet als die Standorte A und C mit 2616,67 bzw. 2550,73 ppm (Abbildung 5.12). Der Gefäßversuch 2008 bestätigt die höheren P-Gehalte von Standorten mit höherer Schwermetallkontamination. Hier liegt der höchstbelastete Standort Br mit 3616,69 an der Spitze der P-Versorgung (Abbildung 5.13).

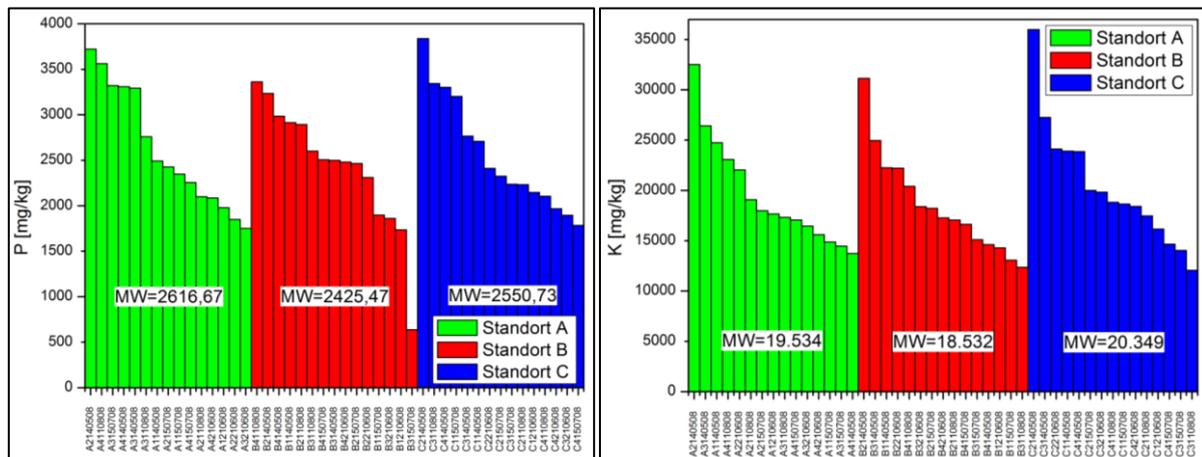


Abbildung 5.12: Nährstoffgehalte von P (links) und K (rechts) [mg/kg] der Pflanzen zwischen den Bodentypen der Gefäßreihe 2007 im Jahr 2008 (absteigend sortiert).

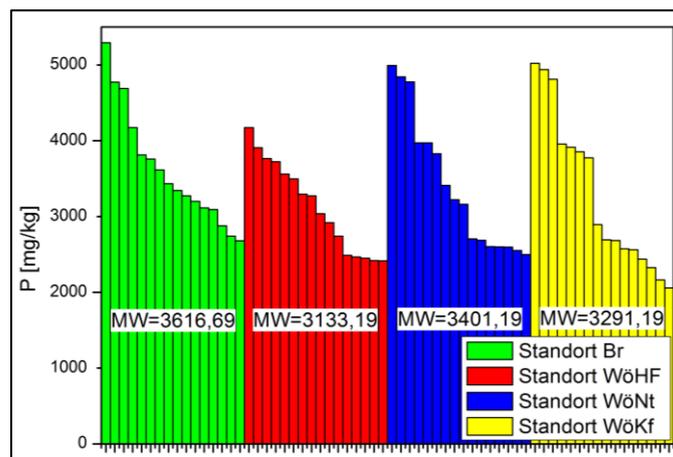


Abbildung 5.13: Nährstoffgehalte von P [mg/kg] der Pflanzen zwischen den Bodentypen der Gefäßreihe 2008 im Jahr 2008 (absteigend sortiert).

Im Boxplot von P ist eine symmetrische Verteilung der Grundgesamtheit zu erkennen. Die Werte schwanken zwischen 1700 und 3800 ppm. Das Element K weist eine leichte rechtschiefe Verteilung auf (Abbildung 5.14). Die Normalverteilung ist bei P bei allen 3 Tests gegeben, bei K wird das Signifikanzniveau von 0,05 nur beim Kolmogorov-Smirnov-Test erreicht (Tabelle 5.6).

Es kann eine allgemeine Aussage zu der Belastungssituation der geomorphologischen Haupteinheiten getroffen werden. Durch die häufigen Überflutungen der flussnahen Niederterrassen sowie das länger stehende Wasser in den Flutrinnen kommt es zu einer stärkeren Sedimentation mit Schwermetallen und Nährstoffen in diesen Bereichen.

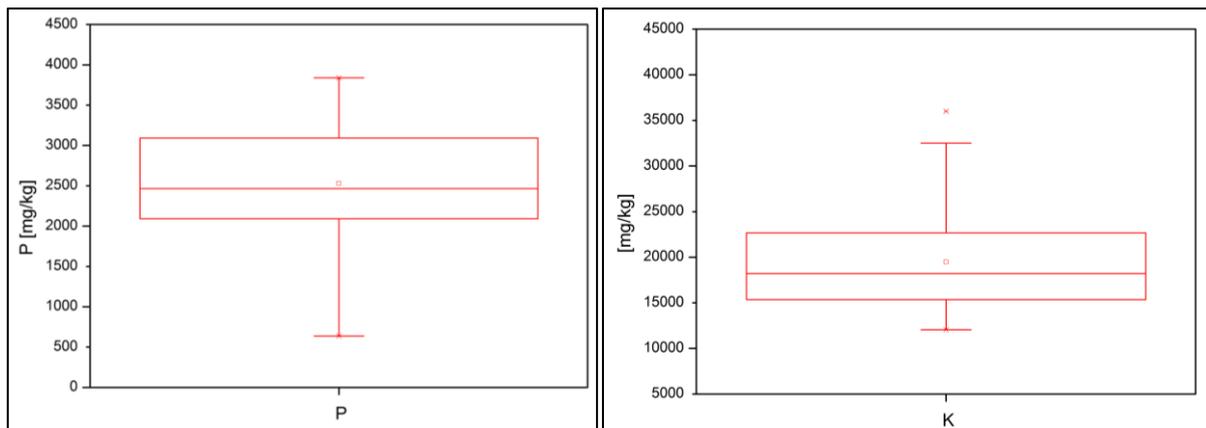


Abbildung 5.14: Boxplot für den Nährstoffgehalt P (links) und K (rechts) der Pflanzen der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

Tabelle 5.6: Normalverteilungstest für den Nährstoffgehalt P und K der Pflanzen der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

Test	Element	DF	Statistik	Prob>D
Shapiro-Wilk	P	45	0,96213	0,14721
	K	45	0,91229	0,00234
Lilliefors	P	45	0,11478	0,14748
	K	45	0,15204	0,01071
Kolmogorov-Smirnov	P	45	0,11478	0,56729
	K	45	0,15204	0,22549

5.1.2 Feldversuch

5.1.2.1 Schwermetallanalysen Pflanzen

Im Feldversuch wurden Daten an der Elbe und Mulde (HyMap-Kampagnen 2008 und 2009) genommen. Die Aufnahmepunkte befinden sich alle im rezenten Überflutungsbereich, direkt am Ufer im Bereich der Niederterrasse, im Hochflächenbereich und in den Rinnen. Insgesamt wurden über 50 Stellen beprobt und gemessen (Abbildung 5.15, Abbildung Anh. 29).

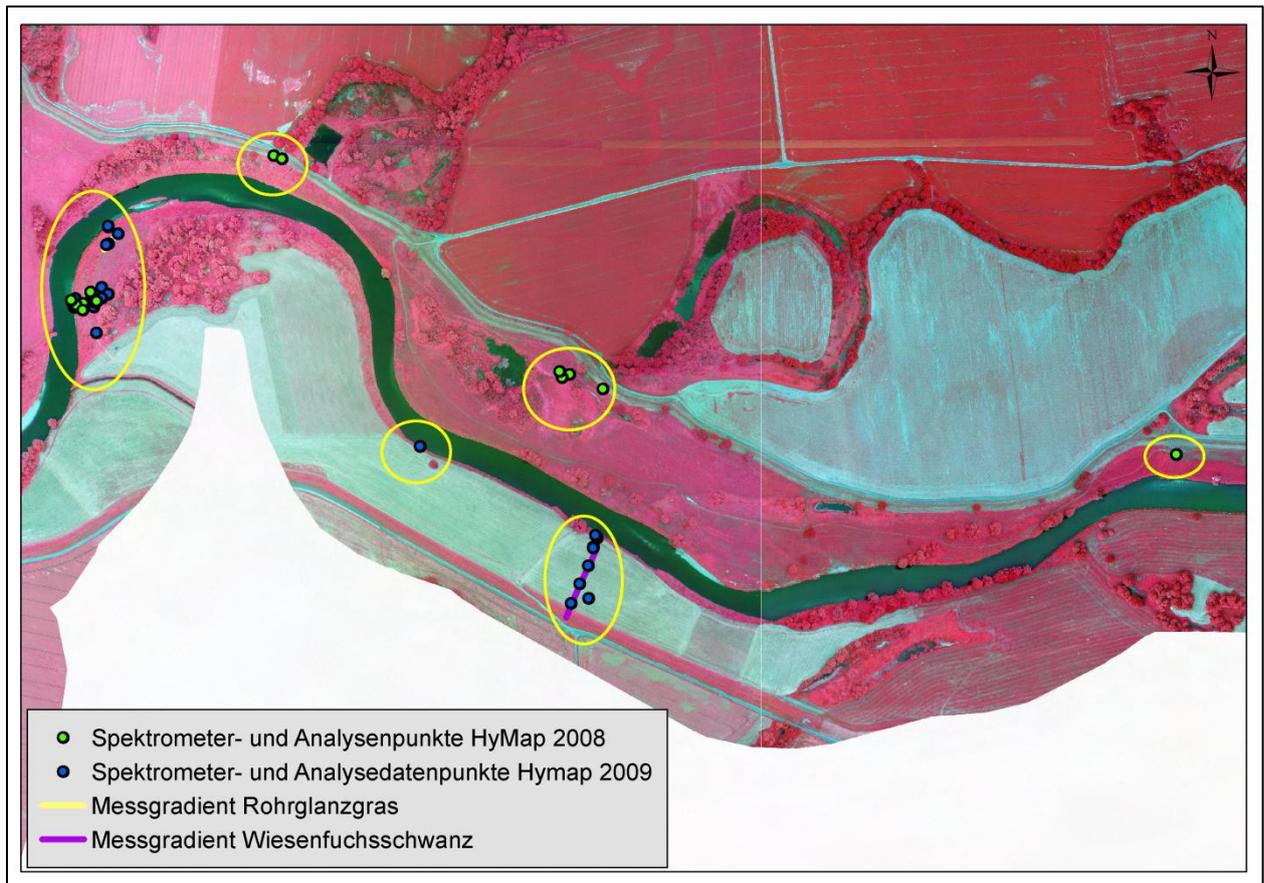


Abbildung 5.15: Spektrometer- und Analysenpunkte für die Kampagnen HyMap 2008 und 2009 im Untersuchungsgebiet D Muldeau.

Die Analysewerte sind sehr variabel im Bezug zur Lage und zur Pflanzenart. Es treten mit weiterer Flussentfernung geringe Kontaminationen auf, die Ausnahme bilden die Senkenbereiche. Dazu kommt die Tiefe des Standorts zur Umgebenden Geländehöhe. In der Formel 5.1, wo die Tiefe des Standorts zur maximalen Geländehöhe vor Ort mit der Entfernung zum Fluss (in 3 Klassen eingeteilt) aufsummiert wurde, zeigten sich bei Cr, Cu, Hg und Zn lineare Trends. Je tiefer gelegen und je näher zum Fluss (größte Klasse), umso größer ist der Lagefaktor (FL) (Abbildung 5.16). Bei Ni zeigen sich keine signifikanten Korrelationen.

Formel 5.1: Lagefaktor für die Messpunkte von 2008 und 2009.

$$F_L = (H_{max} - H_x) + E_K$$

- F_L = Lagefaktor
 H_{max} = maximale Geländehöhe
 H_x = Geländehöhe am Messpunkt
 E_K = Entfernung des Messpunkts vom Fluss
 (Klasse 1: über 25 m, Klasse 2: 25-3 m, Klasse 3: 1-3 m)

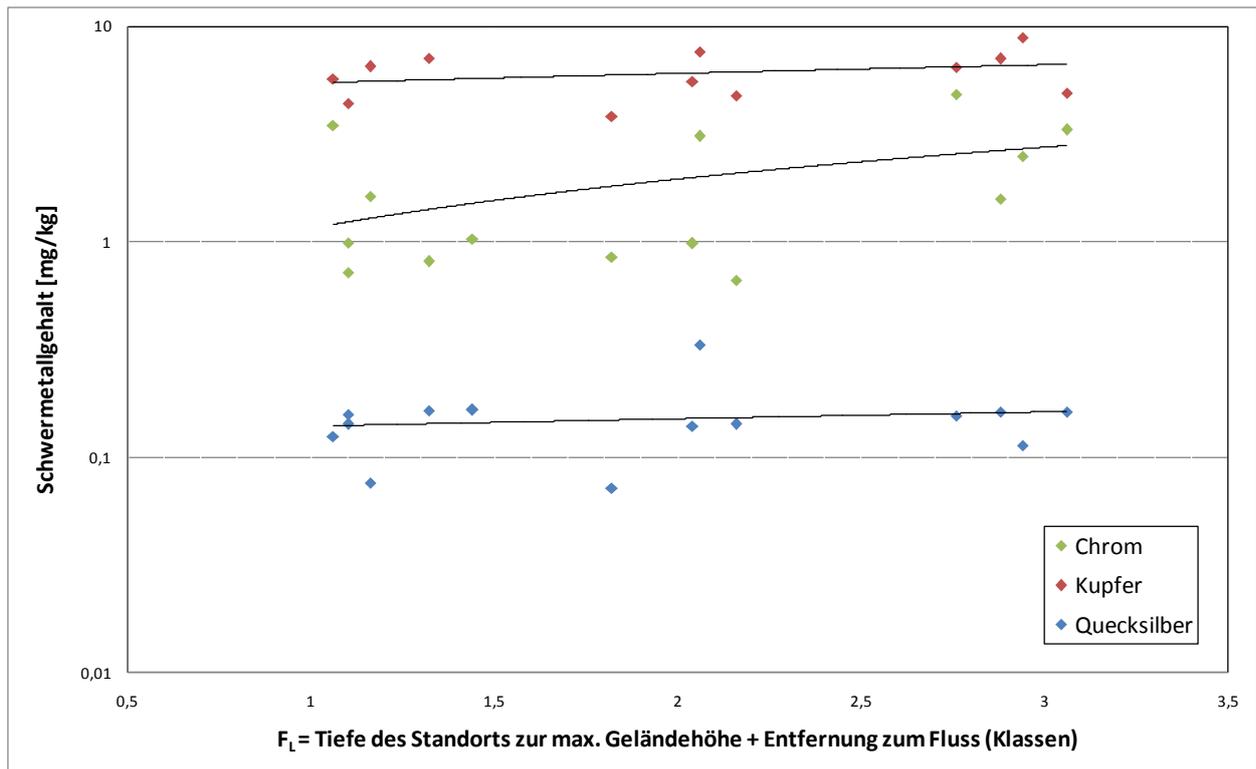


Abbildung 5.16: Lagefaktor (FL) für die Messpunkte von 2008 und 2009 verglichen mit ihren zugehörigen Schwermetallgehalten [mg/kg].

Dennoch gibt es weitere Einflussfaktoren für die Vegetation im Feld, die nicht bestimmt werden konnten. Das Spektralsignal und dessen abgeleitete Methoden können dann indirekt die Verhältnisse in der Pflanze besser darstellen. Die Analysewerte sind insgesamt stark schwankend, da hier Pflanzenart, Bodentyp, Morphologie, Wasserversorgung, Mahd, Entfernung zum Fluss u.a. Parameter einen Einfluss haben (Abbildung Anh. 30, Abbildung Anh. 31, Abbildung Anh. 34, Abbildung Anh. 35, Abbildung Anh. 38, Abbildung Anh. 39). Die Maxima der Elemente können als mittel- bis hochbelastet eingestuft werden (Tabelle Anh. 5, Tabelle Anh. 6, Tabelle 5.7). Die Werte der Analysen im FFH-Gebiet „Vereinigte Mulde und Muldeau“ sind höher belastet als die Standorte der „Mittleren Elbe“ bei Wörlitz. Der Grund für diese Unterschiede könnte die stärkere Beeinflussung der ehemaligen Industrie sein.

Insgesamt wurde eine höhere Belastung im Mittel bei der Brennessel (außer Chrom) gegenüber den Gräsern festgestellt. Eine Ursache könnte die Klasse der Pflanzen sein (Mono- oder Dikotyle).

Tabelle 5.7: Mess- und Analysedaten für die HyMap-Kampagne 2009.

Element	Einheit	N gesamt	Mittelwert	Standard- abweichung	SE des Mittelwerts	Varianz	Summe	Variations- koeffizient	Geometrischer Mittelwert	Minimum	Median	Maximum
As	mg/kg	1	9,50	--	--	--	9,50	--	9,50	9,50	9,50	9,50
Cd	mg/kg	16	1,84	2,45	0,61	5,99	29,49	1,33	0,87	0,16	0,99	9,07
Cr	mg/kg	25	4,23	8,02	1,60	64,29	105,78	1,89	2,27	0,66	2,00	40,80
Cu	mg/kg	25	8,90	4,39	0,88	19,31	222,47	0,49	8,02	3,82	7,09	18,60
Hg	mg/kg	25	0,14	0,05	0,01	0,00	3,61	0,37	0,14	0,07	0,14	0,33
K	mg/kg	25	21412,60	9130,45	1826,09	83365000,00	535315,00	0,43	20029,13	11300,00	18500,00	49020,00
Lignin	%	25	15,35	7,21	1,44	51,95	383,87	0,47	13,08	2,59	18,50	25,30
N	%	25	3,33	0,65	0,13	0,42	83,33	0,19	3,27	2,09	3,42	4,47
Ni	mg/kg	24	6,61	7,15	1,46	51,13	158,64	1,08	3,48	0,32	3,96	25,20
P	mg/kg	25	2538,80	756,70	151,34	572597,75	63470,00	0,30	2451,76	1752,00	2300,00	4568,00
Pb	mg/kg	3	7,19	8,41	4,86	70,76	21,56	1,17	4,51	2,31	2,35	16,90
SPAD (Feld)		24	37,79	3,49	0,71	12,17	906,90	0,09	37,63	31,00	38,50	43,90
SPAD (Labor)		19	39,01	4,03	0,93	16,27	741,10	0,10	38,80	31,20	39,50	45,10
Wassergehalt	%	19	61,76	5,02	1,15	25,15	1173,48	0,08	61,57	54,32	61,38	68,88
Zn	mg/kg	25	207,42	148,69	29,74	22107,23	5185,40	0,72	154,50	32,10	148,00	472,00

Der Median der Schwermetallwerte liegt innerhalb der Box links bis stark links, so dass eine rechtsschiefe Verteilung der Daten vorliegt (Abbildung 5.17). Ebenso sind die die Boxplots unsymmetrisch. Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigt alle Daten als Normalverteilt auf, der Lilliefors-Test nur Cr.

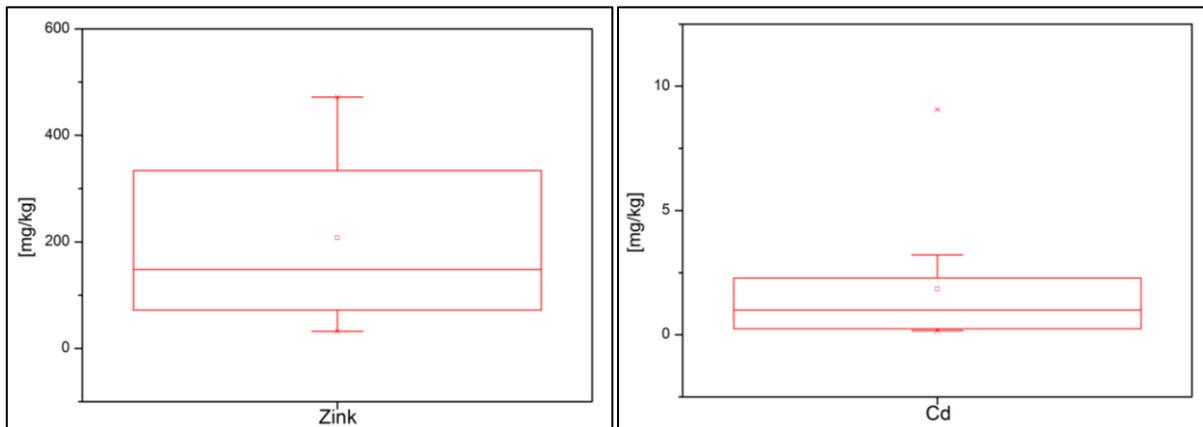


Abbildung 5.17: Boxplot des Schwermetallgehalts von Zn (links) und Cd (rechts) der HyMap-Kampagne 2009.

5.1.2.2 Nährstoffanalysen und Inhaltsstoffe Pflanzen

Bei den Nährstoffen P und K gibt es nur geringe nicht lineare Unterschiede zwischen den Pflanzenarten, dagegen ist der Ligningehalt bei den Brennesseln bei ca. 50 % von dem der anderen Arten. Mit einem Mittelwert von ca. 66 % Wassergehalt sind sie um 6% über dem der anderen Pflanzenarten (Abbildung 5.18). Beim Stickstoffgehalt zeigen die Wiesenfuchspflanzen einen niedrigeren Gehalt von ca. 2,5 % gegenüber 3,5 % der anderen Arten. Auch hier lassen sich anatomische Unterschiede als Ursache heranziehen.

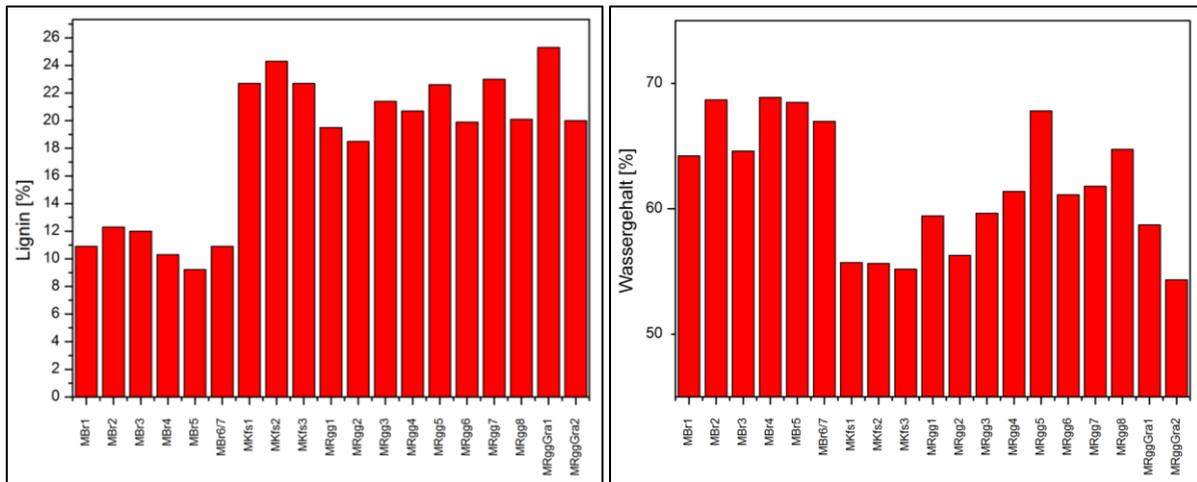


Abbildung 5.18: Lignin- [%] (links) und Wassergehalt [%] (rechts) der Pflanzen der HyMap-Kampagne 2009. Br = Brennnessel, Rgg = Rohrglanzgras, Wfs = Wiesenfuchsschwanz.

Das Boxplot des Kalium-, Stickstoff-, Lignin- und Wassergehalts ist symmetrisch. Die Normalverteilung beim Kalium, Stickstoff und Wassergehalt ist beim Shapiro-Wilk-Test signifikant gezogen worden. Bei dem Lilliefors-Test kommt P hinzu. Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigt alle Daten als normalverteilt an (Abbildung Anh. 32, Abbildung Anh. 36, Abbildung Anh. 40, Abbildung Anh. 42, Abbildung Anh. 43).

5.1.2.3 Chlorophyllmessungen Pflanzen

Es wurden zu verschiedenen Zeitpunkten des Jahres neben den Gefäßversuchsmessungen ca. 90 SPAD-Werte an Elbe und Mulde aufgenommen, vergleichend dazu einige Werte aus den analytischen Bestimmungen. Eine Normalverteilung sowie die Symmetrie des Boxplots sind gegeben (Abbildung Anh. 33, Abbildung Anh. 37, Abbildung Anh. 41). Das Sinken der Chlorophyllgehalte wird gesteuert durch die phänologische Veränderung im Jahresverlauf, auch die Messdaten gleicher Zeitpunkte zeigen Differenzen.

5.2 Spektraldatenergebnisse

Die Spektraldaten setzen sich aus den Messungen des Feldversuchs und Gefäßversuchs zusammen. Hierbei wurden die Daten entweder in-situ oder im Labor gemessen. Die punktuellen Messungen oder Referenzdaten für die flächenhaften abbildenden Daten sind im Bereich der Elbe bei Wörlitz, Steckby, Breitenhagen und im Bereich der Mulde nahe des Muldestausees bei Löbnitz (Abbildung 5.15) aufgenommen worden. Durch das apriorische Wissen (Schwermetallanalysen vom UFZ, Bodenformenkarten) kann eine Messwertvariabilität zwischen den Gefäßtypen und Messpunkten vorausgesetzt werden. Die Darstellung der Signaturkurven der Objekte ist eine wellenlängenabhängige Reflexionsverteilung. Die Auswertung der Daten findet erst nach der Vorverarbeitung statt, um eine einheitliche Basis zu besitzen. Entweder werden die Kurven in einem Plot im Gesamten oder je nach Standort und/oder Pflanzentyp dargestellt. Durch die genaue visuelle Betrachtung konnte die anschließende Analyse und Methodik effizienter angewandt werden.

5.2.1 Gefäßversuch

Der Gefäßversuch ist die Grundlage für die spektrale Auswertung sowie die Methodenentwicklung. Hier wurden über 2500 Spektralwerte mit dem ASD FieldSpec Pro FR gemessen. Die Spektren sind im Allgemeinen variabel über den Vegetationszeitraum. Dabei zeigen sich bestimmte Bereiche von Abweichungen des Reflexionsgrads zwischen den Kurven in der Höhe und Form wie z.B. der rote Bereich im sichtbaren Licht. Die relativen Unterschiede in der Reflexionshöhe reichen über 30 % (Abbildung 5.19).

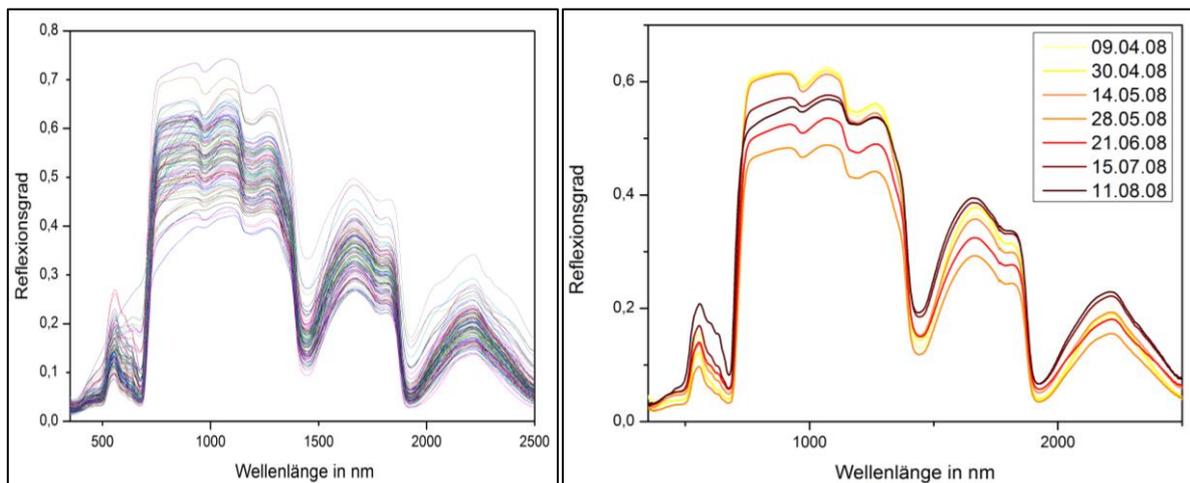


Abbildung 5.19: Gesamtvariation (links) und Variation des Beifußes (rechts) der gemittelten Spektren vom Gefäßversuch 2007 Jahr 2008.

Von April bis September verändern sich die Spektren im typischen spektralen Verlauf (Abbildung 5.19). Der sichtbare Bereich zeigt einen Anstieg, insbesondere im Rot. Im nahen und mittleren Infrarot werden die Unterschiede zwischen den Reflexionshöhen und den Absorptionsbanden geringer. Auch die Form bei 820 nm flacht im Laufe der phänologischen Phase ab (zellstrukturelle Veränderungen). Dabei zeigen sich die Typen A und C im allgemeinen Kurvenverlauf mit leicht erhöhter Reflexion gegenüber Typ B (Abbildung 5.20). Dies ist aber nicht immer gültig, .d.h. die Bedingungen der Pflanzen sind möglicherweise durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Bei der Bewertung der einzelnen Gefäßtypen können ebenso Abweichungen im Bereich der 6 relevanten Spektralbereiche (430-770, 910-1020, 1080-1200, 1260-1450, 1660-1950 und 2180-2300 nm) zwischen den Gruppen A, B und C festgestellt werden. Diese Variationen sind gegenüber den phänologisch bedingten um ein vielfaches geringer und können oft nur durch die angewandten Verfahren extrahiert werden. Die Abhängigkeiten zwischen den Spektraldaten und den Analysedaten werden im Abschnitt 5.4 „Korrelationsanalyse“ untersucht.

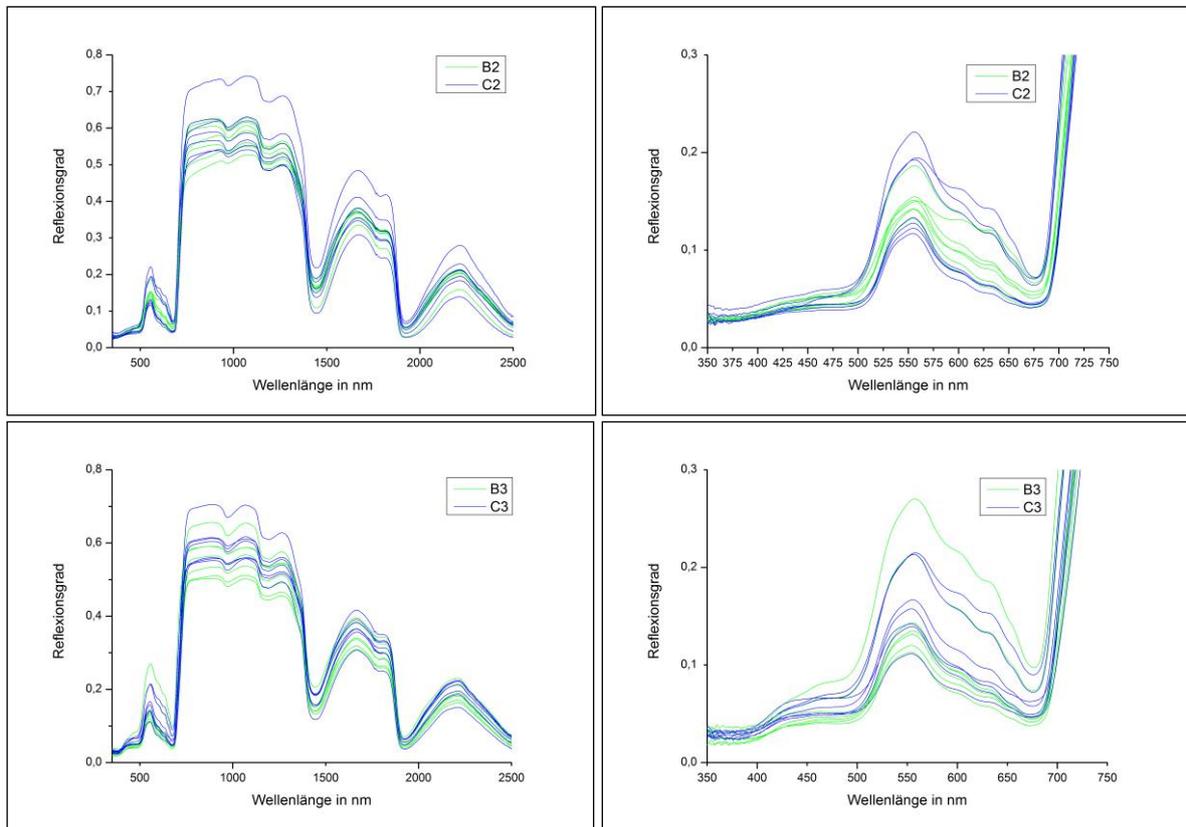


Abbildung 5.20: Vergleich der Spektraldaten von Beifuß (2) (oben) und Brennnessel (3) (unten) auf Bodentyp B (Hochfläche) und C (Rinne) der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

5.2.2 Feldversuch

Bei den feldspektrometrischen Messungen an der Elbe und Mulde ist der Zeitpunkt der Messungen nach der wasserfreien Periode in den Rinnen gewählt worden (kein Wasserstress durch Überangebot). Somit konzentrieren sich die Messungen im Zeitraum von Mai bis August. Zusätzlich sind 2 Messkampagnen für die HyEurope - Befliegung 2008 und 2009 an der Mulde durchgeführt worden. Wie im Abschnitt 5.2 "Spektraldatenergebnisse" beschrieben, sind die geomorphologischen, lagespezifischen und botanischen Bereiche der Aue abgedeckt.

Die Schwankungen der Spektren zwischen den Standorten und Arten zeigen sich insbesondere im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarots. Ebenso zeigen sich die typischen verrauschten Bereiche der Wasserabsorptionsbanden bei 1400 und 1900 nm (Abbildung 5.21). Die besser wasserversorgten Standorte wie Niederterrasse und Senke zeigen häufig ein geringfügig höheres Reflexionsmaximum im nahen Infrarot. Genauere methodische Analysen folgen im Abschnitt 5.4.3 "Korrelation zwischen Analysewerten und Spektralwerten".

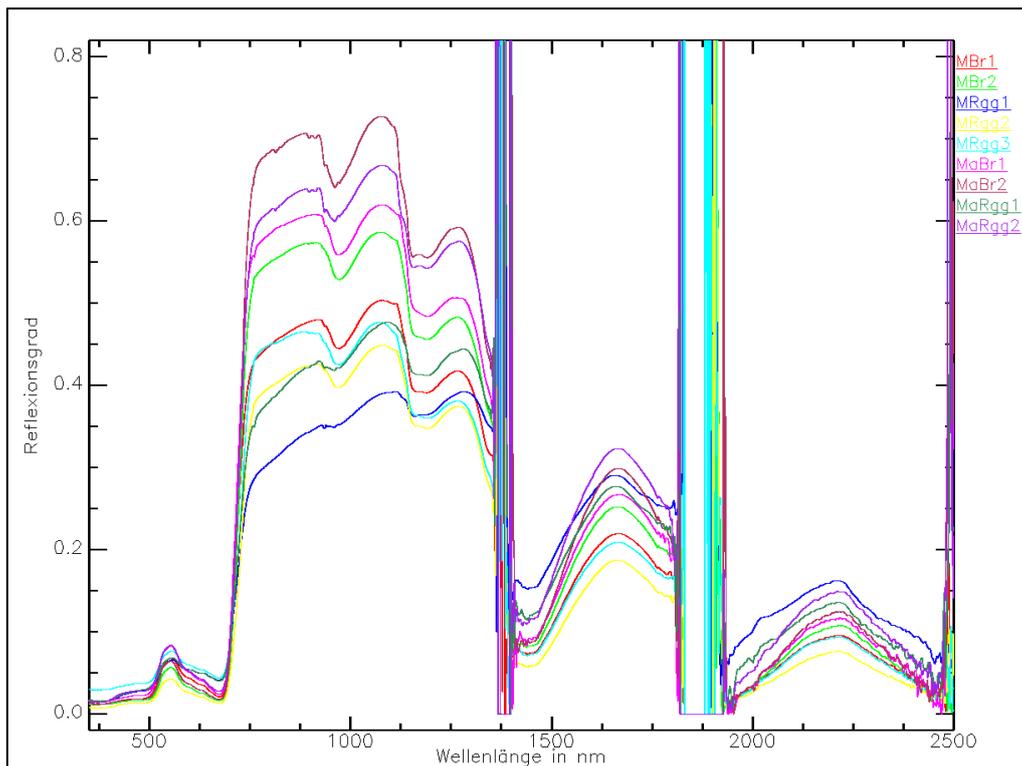


Abbildung 5.21: Auswahl von Spektraldaten der HyMap-Kampagne 2008.

5.2.3 Aufbau einer Spectral Library und Spektralsimulation

Die vorverarbeiteten Spektren werden einerseits im Teil der Algorithmentwicklung (siehe Kapitel 4 Algorithmentwicklung), andererseits in einer *Spectral Library* weiterverarbeitet (Abbildung 5.22). Insgesamt wurden über 300 Referenzspektren in die Bibliothek aufgenommen, unterteilt in Gefäßversuchsreihen und Feldkampagnen. Diese stellen Vergleichsdaten für reine Objektklassen (Einzelpflanzen) von Fernerkundungsdaten dar. Die Bibliotheken bieten die Möglichkeit zur Identifizierung spektraler Signaturen. Sie halten ihre Informationen in einem hyperspektralen Datenformat. Es folgt eine spektrale Simulation auf die in der Arbeit verwendeten Sensoren. Hierbei werden die über 2100 Spektralkanäle auf hyper- oder multispektrale Sensoren reduziert. Das spektrale Resampling wandelt die Daten des Spektrometers in 126 Kanäle für HyMap und 256 für AISA (zwischen 350-950 nm). Von den 45 bekannten und neuen Methoden der Arbeit können nach dem Resampling im ENVI 4.4 bei HyMap alle 45 und bei AISA 27 angewendet werden (Tabelle Anh. 7). Zahlreiche Methoden (Wasser- und Biochemieindizes) fallen bei AISA aufgrund des zu geringen Spektralbereichs heraus (Abbildung 5.23). Bei allen Methoden muss eine Anpassung an die Kanallage und -breite stattfinden. Eine Verschiebung der Banden kann möglicherweise die Funktionalität der Methode einschränken. Es zeigt sich, dass eine maximale spektrale Auflösung von 10 nm für die Analyse von Vegetationsspektren zur Verfügung stehen muss, da sonst die Absorptionsbanden für Wasser und chemische Inhaltsstoffe wegfallen. Mit den simulierten Spektren können die neu entwickelten bzw. als signifikant korrelativen Methoden auf ihre Übertragbarkeit auf die Fernerkundungsdaten getestet werden.

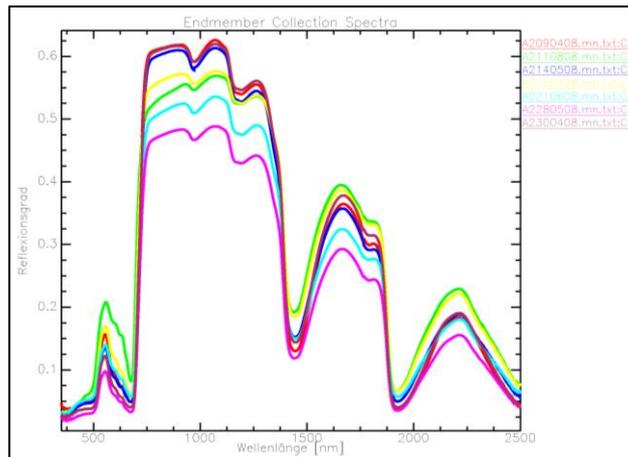


Abbildung 5.22: Spectral Library für Beifuß der Gefäßversuchsreihe 2008.

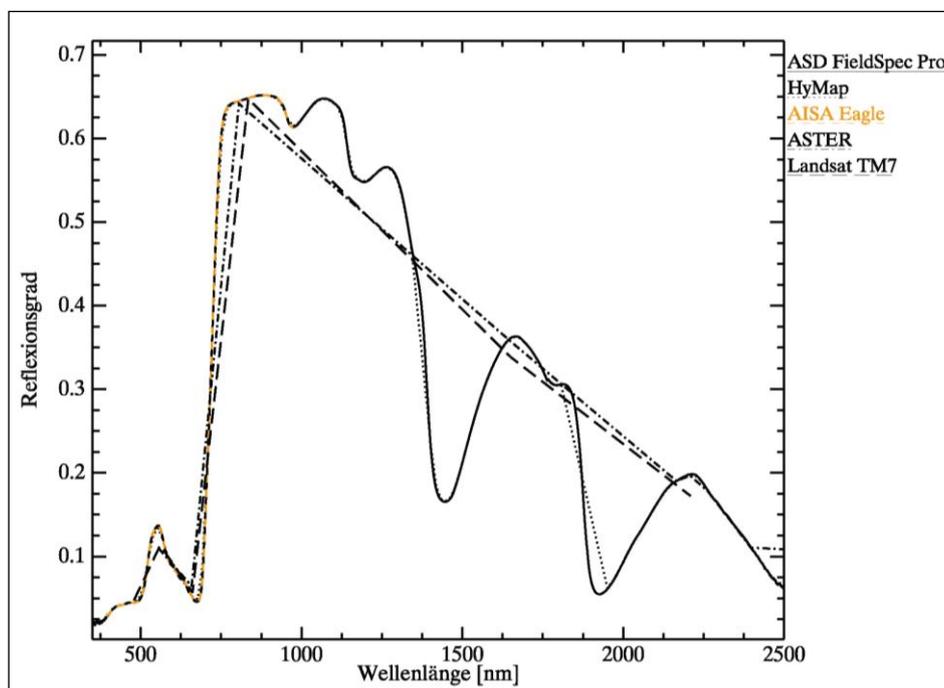


Abbildung 5.23: Simulationspektren von Rohrglanzgras für verschiedene Fernerkundungsdatensätze.

5.3 Sensitivitätsanalyse

Diese Bewertung der Methoden dient als Plausibilitätskontrolle für deren Anwendung in der Arbeit. Insgesamt zeigen sich alle getesteten Methoden sensitiv, d.h. es ist eine Veränderung innerhalb der Vegetationsperiode bzw. zwischen den Kontaminationsgraden zu erkennen. Als Maß wird der Variationskoeffizient für die jeweiligen Methoden angegeben (Abbildung 5.24, Tabelle Anh. 8, Tabelle Anh. 9, Tabelle Anh. 10). Die Abweichungen gegenüber dem Mittelwert müssen aber noch im Verhältnis zum maximalen Schwankungsraum der Anwendung in der Literatur für Kräuter und Gräser gesehen werden. Das wurde partiell für einige Indizes ermittelt. Obwohl z.B. der WBI nur 2% Variation (0,950 bis 1,1) vom Mittelwert hat, ist der Gesamtindexraum (0,9-1,5) relativ ausgefüllt (25 %). Bei dem CAI ist eine größere Variation (über 250 %) zu erkennen, in der Literatur jedoch wird der Wertebereich für Grasland von -4 bis 8 angegeben, was gleichbedeutend mit einer 10 prozentigen Schwankung ist. In

weiteren Untersuchungen könnte die Ermittlung des Schwankungsraums jedes Indizes eine gute Vorauswahl für die Sensitivität der Methode gegenüber Stress sein.

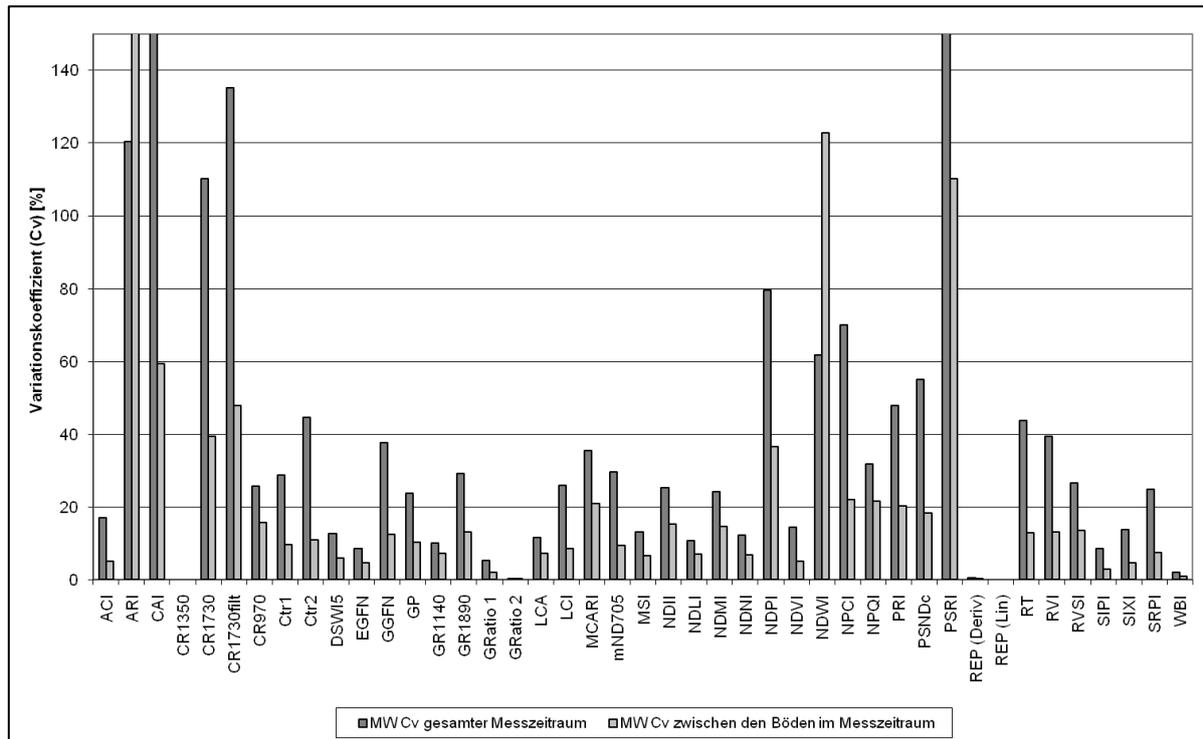


Abbildung 5.24: Variationskoeffizient Cv [%] der Methoden in der Gefäßversuchsreihe 2007 im gesamten Messzeitraum 2008 und zwischen den Bodentypen (A, B, C) im Messzeitraum 2008.

Wenn die Methoden nach ihren Untersuchungsparametern gruppiert werden, zeigt sich über das Jahr verteilt eine unterschiedlich starke Variation in den einzelnen Monaten. Während die Pigmentindizes von Ende April bis Mitte Mai (Zeitfenster I) und Ende Juni (Zeitfenster II) die höheren Variationen haben, sind die Wasserindizes, Biochemieindizes sowie die entwickelten Methoden Mitte Juli (Zeitfenster III) variabel (Abbildung 5.25, Abbildung Anh. 44, Abbildung Anh. 45, Abbildung Anh. 46, Abbildung Anh. 47, Abbildung Anh. 48). Diese Unterschiede sind durch die verschiedenen untersuchten Parametern zu erklären. Die Pigmente verändern sich stark in der Wachstumsperiode April und Mai, dagegen treten Wassergehalts- und biochemische Unterschiede insbesondere in der Reifephase hervor. Vergleichend mit den Ganglinien der Wasserstände der Elbe und Mulde aus dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch von 2004 für die Station Aken, Barby und Torgau (DGJ, 2004) und den Vegetationsperioden der Auenvegetation aus den Angaben des Gefäßversuch von 2007 und 2008 sowie den Phänologiedaten des DWD von 2009 für Grassland (DWD, 2009), können für die Variationen der Methoden Zeitfenster (I, II und III) für die optimale Aufnahme von Mess- oder Fernerkundungsdaten zur Schwermetalldetektion ermittelt werden (Abbildung 5.26). Das Zeitfenster für die geeignetste Methode zur Bestimmung von Schwermetallstress bei Auenpflanzen ist in Abschnitt 5.7 „Nutzbarkeit des entwickelten Algorithmus“ zu finden.

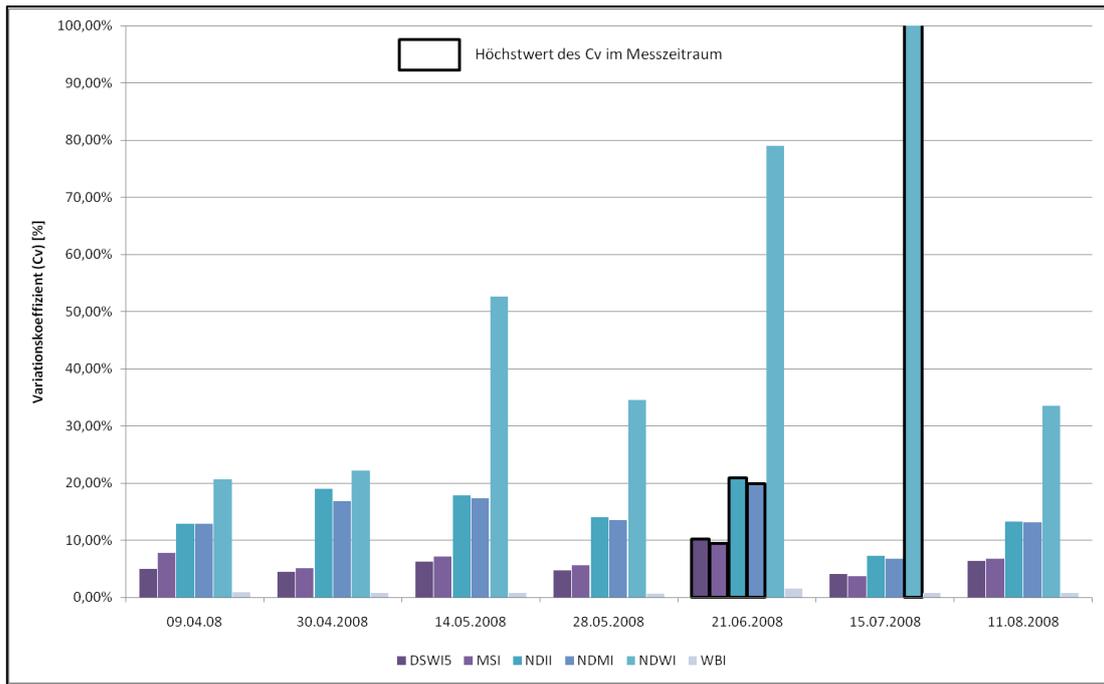


Abbildung 5.25: Variationskoeffizienten der untersuchten Wasserindizes der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

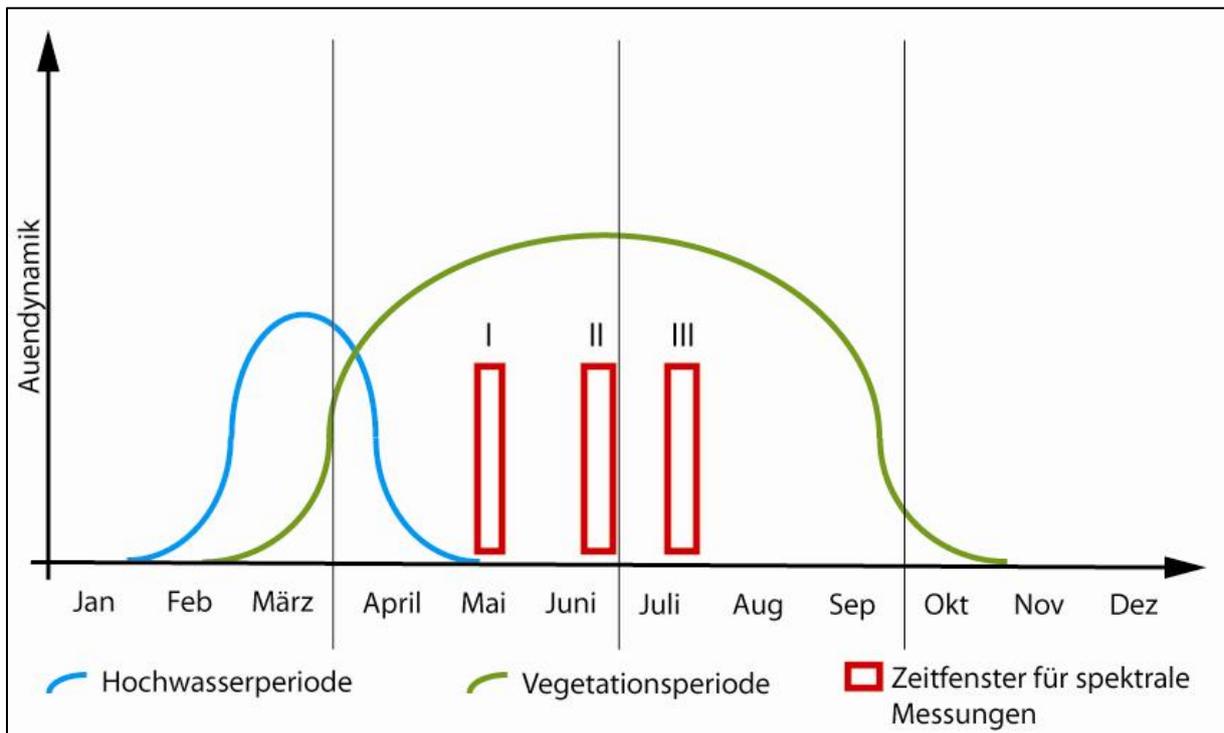


Abbildung 5.26: Mittlere Zeitfenster für spektrale Messungen zur Parametrisierung von Stressoren in Auengebieten für den Zeitraum 2007-2009.

5.4 Korrelationsanalyse

5.4.1 Interkorrelation zwischen den Parametern

Die Interkorrelationen geben Aufschluss über die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den Parametern. Die meisten Schwermetalle haben eine positive Korrelation zueinander. Die höchsten signifikanten Abhängigkeiten haben As, Pb und Cd. Tendenziell können negative Korrelationen zwischen dem relativen Chlorophyllgehalt (SPAD) und den Schwermetallen abgeleitet werden (Tabelle Anh. 11, Tabelle Anh. 12, Tabelle Anh. 13, Tabelle Anh. 14). Bei Cadmium verhält sich die Abhängigkeit umgekehrt, d.h. wenn die Pflanze weniger Chlorophyll besitzt, ist auch der Cd-Gehalt geringer. Bei den Nährstoffen (P) können keine signifikant hohen Wechselbeziehungen (geringe mit SPAD) ermittelt werden (Tabelle 5.8).

Tabelle 5.8: Interkorrelationen (Spearman Korrelationskoeffizient) zwischen den untersuchten Parametern der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

Element	Korrelationskoeffizient	As	Cd	Cr	Cu	K	Ni	P	Pb	SPAD	Zn
As	Spearman	1									
Cd	Spearman	0,31566	1								
Cr	Spearman	0,56226	-0,21335	1							
Cu	Spearman	0,59242	0,69178	0,22002	1						
K	Spearman	-0,19508	0,62485	-0,67305	0,24007	1					
Ni	Spearman	0,51802	0,52932	0,29266	0,48277	0,144	1				
P	Spearman	-0,25907	0,12841	-0,16572	0,03581	0,32432	0,05019	1			
Pb	Spearman	0,86457	-0,19348	0,58171	0,42406	-0,27609	0,53184	-0,32125	1		
SPAD	Spearman	-0,35533	0,56293	-0,47171	0,22283	0,50674	0,15629	0,28148	-0,46714	1	
Zn	Spearman	0,44469	-0,06223	0,14441	0,36711	0,09717	0,12817	0,06529	0,31787	-0,22199	1

5.4.2 Korrelation zwischen Boden und Pflanze

Die verschiedenen Kontaminationen in den Gefäßbodentypen werden mit den Kontaminationen in den Pflanzen verglichen, um den Transfer zwischen den Medien darstellen zu können. Die Korrelationen sind positiv, aber nicht hoch signifikant. Sie liegen im Bereich zwischen 0,1 und 0,3 und zeigen somit nur eine Tendenz (Abbildung 5.27, Abbildung Anh. 49). Diese geringen Korrelationen können auf die verschiedenen Bodenform und den damit verschiedenen Bindungspotentialen zurückgeführt werden. Das Angebot an Gesamtschwermetall in Niederterrassen und Rinnen ist höher als auf den Hochflächen. Die Pflanzenverfügbarkeit ist aber noch von anderen Faktoren wie z.B. der Austauschkapazität abhängig.

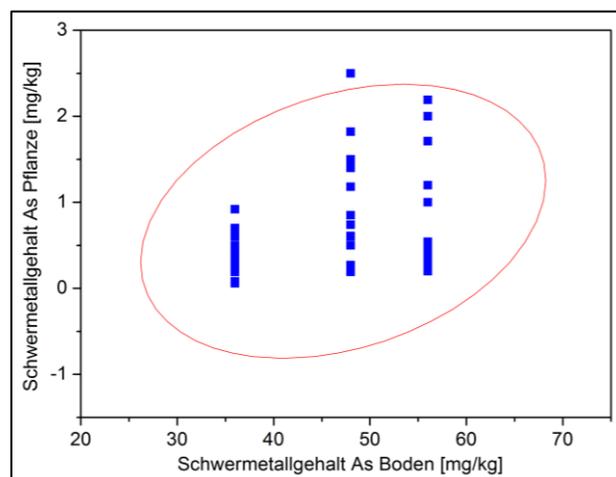


Abbildung 5.27: Beziehung zwischen dem Schwermetallgehalt As [mg/kg] des Bodens und der Pflanze der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

5.4.3 Korrelation zwischen Analysewerten und Spektralwerten

5.4.3.1 Gefäßversuch

Ein wesentlicher Faktor zur Algorithmusentwicklung ist die Beziehung der bekannten und zu testenden neuen Methoden zu den erfassten Analysedaten. Nach der deskriptiven Statistik und der Sensitivitätsanalyse werden alle Methoden mit den Analysedaten (Schwermetallgehalt, Chlorophyllgehalt, Nährstoffgehalt und Wassergehalt) in einer Korrelationsanalyse in Beziehung gesetzt. Dabei werden jeweils 2 Korrelationskoeffizienten bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ angewendet.

Im standardisierten Gefäßversuch können viele Faktoren der realen Natur ausgeschlossen werden. So kann der Schwermetallstress als Ursache untersucht werden und dient somit als Grundlage für die spätere flächenhafte Anwendung mittels Fernerkundungsdaten. Die Gefäßversuchsreihe von 2007 (Jahr 2008) zeigt beim Parameter Chlorophyll (SPAD) im Schnitt hohe Korrelationen bei vielen Methoden. Alle Korrelationskoeffizienten stehen als Absolutwerte in der Tabelle 5.9, Tabelle Anh. 15 und Tabelle Anh. 16. Die Farben symbolisieren die jeweiligen untersuchten Parameter der Methoden (Grün = Pigmente, Rot = Red-Edge, Blau = Wasser, Gelb = biochemische Parameter und Weiß = neu entwickelte Methoden, noch ohne Bezug). Dies gilt für alle nachfolgenden Tabellen.

Tabelle 5.9: Korrelationskoeffizienten der Spektralmethoden und des relativen Chlorophyllgehalts (SPAD).

Methode	Korrelationskoeffizient	SPAD	Methode	Korrelationskoeffizient	SPAD
mND705	Pearson	0,858	GGFN	Spearman	0,876
GGFN	Pearson	0,854	Ctr1	Spearman	0,863
Ctr1	Pearson	0,848	PSNDc	Spearman	0,855
PSNDc	Pearson	0,848	NPCI	Spearman	0,855
SRPI	Pearson	0,840	SRPI	Spearman	0,855
NPCI	Pearson	0,826	NDPI	Spearman	0,853
LCI	Pearson	0,823	mND705	Spearman	0,850
REP (Deriv)	Pearson	0,822	ARI	Spearman	0,847
NDPI	Pearson	0,822	Ctr2	Spearman	0,833
Ctr2	Pearson	0,814	REP (Deriv)	Spearman	0,816
ARI	Pearson	0,813	LCI	Spearman	0,809
SIXI	Pearson	0,793	SIXI	Spearman	0,790
RVI	Pearson	0,753	PRI	Spearman	0,745
NDVI	Pearson	0,741	NDVI	Spearman	0,742
PRI	Pearson	0,739	RVI	Spearman	0,742
RT	Pearson	0,714	ACI	Spearman	0,720
ACI	Pearson	0,698	RT	Spearman	0,701
SIPI	Pearson	0,685	PSRI	Spearman	0,681
NDWI	Pearson	0,634	SIPI	Spearman	0,666
WBI	Pearson	0,626	NDWI	Spearman	0,664
GP	Pearson	0,604	WBI	Spearman	0,653
NDII	Pearson	0,597	NDII	Spearman	0,626
CR970	Pearson	0,590	NDMI	Spearman	0,621
NDMI	Pearson	0,589	MSI	Spearman	0,620
MSI	Pearson	0,585	GP	Spearman	0,608
PSRI	Pearson	0,582	CR1725	Spearman	0,596
DSWI5	Pearson	0,557	CAI	Spearman	0,590
CAI	Pearson	0,524	DSWI5	Spearman	0,566
RVSI	Pearson	0,500	NDNI	Spearman	0,528
NPQI	Pearson	0,489	CR970	Spearman	0,525
CR1725	Pearson	0,488	EGFN	Spearman	0,509
NDNI	Pearson	0,480	NPQI	Spearman	0,502
MCARI	Pearson	0,469	RVSI	Spearman	0,502
EGFN	Pearson	0,460	GR1890	Spearman	0,488
GR1890	Pearson	0,456	MCARI	Spearman	0,463
REP (Lin)	Pearson	0,456	REP (Lin)	Spearman	0,456
GRatio 1	Pearson	0,320	GRatio 1	Spearman	0,366
LCA	Pearson	0,271	LCA	Spearman	0,293
CR1350	Pearson	0,234	NDLI	Spearman	0,261
NDLI	Pearson	0,228	CR1350	Spearman	0,234
GRatio 2	Pearson	0,194	GRatio 2	Spearman	0,195
GR1140	Pearson	0,037	GR1140	Spearman	0,036

Bei 11 Methoden, ausschließlich Pigmentindizes und REP-Verfahren, sind signifikante Korrelationen (Pearson/Spearman) von über $R_{SPAD} = 0,8$ zu finden. Es zeigt sich der Green-green first derivative normalized difference (GGFN), ein Ableitungsindex, als stärkster Index mit $R_{SPAD} = 0,858$ (Pearson) / 0,876 (Spearman) (pos. Korrelation) (Abbildung 5.28).

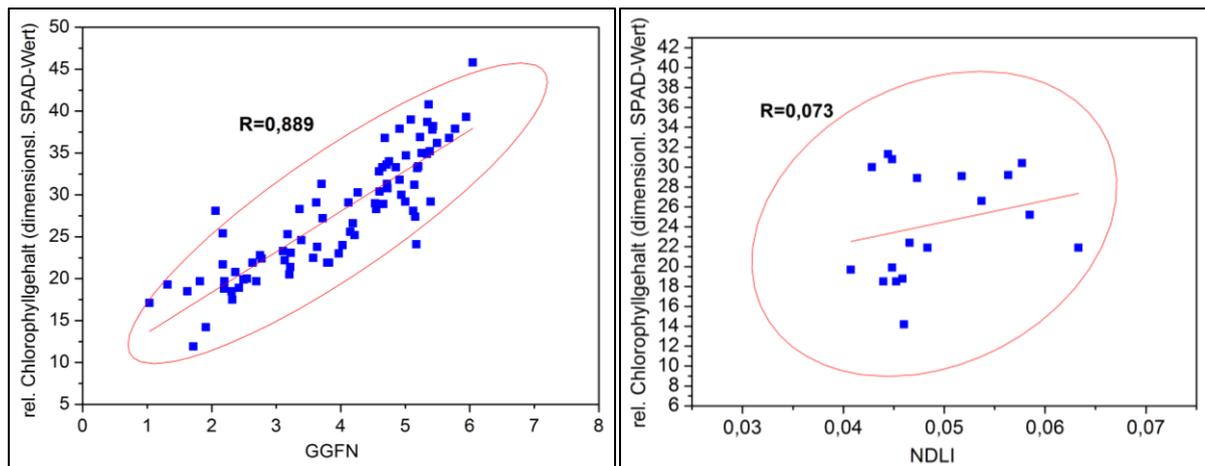


Abbildung 5.28: Streumatrix zwischen dem GGFN und dem relativen Chlorophyllgehalt (SPAD) der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 bei den 5 untersuchten Pflanzenarten (links) und dem NDLI und dem relativen Chlorophyllgehalt (SPAD) und Streumatrix zwischen dem der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 bei Brennesselpflanzen (rechts).

Auffällig im unteren Teil der absteigenden Rangfolge rangieren die Indizes/ CR-Methoden, die den Wassergehalt (DSWI5 $R=0,566$) bzw. die biochemischen Parameter wie z.B. Lignin (NDLI $R=0,261$) bestimmen (Abbildung 5.28). Damit zeigt sich eine erwartend hohe Abhängigkeit zu den Methoden die den Parameter Chlorophyll extrahieren sollen.

Bei den Schwermetallen werden die Elemente einzeln mit den Methoden korreliert, zur einfacheren Einordnung und Bewertung werden alle Einzelkorrelationen gemittelt. Es zeigen sich signifikante Korrelationen bei einigen Pigmentindizes, der CR1725, dem GRatio1 und den Blattwassergehaltsindizes (Tabelle 5.10, Tabelle Anh. 17, Tabelle Anh. 18). Zwischen den beiden Koeffizienten zeigen sich geringe Unterschiede in dem Zusammenhangsmaß, da die Ausreißer unterschiedlich stark bewertet werden. Beim Spearman treten die Wasserindizes deutlich dominanter auf, während beim Pearson die CR1725 weiter vorn in der Rangfolge steht.

Tabelle 5.10: Korrelationskoeffizienten der Spektralmethoden und des gemittelten Schwermetallgehalts (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn).

Method	Korrelationskoeffizient	SM	Method	Korrelationskoeffizient	SM
RT	Pearson	0,675	DSWI5	Spearman	0,673
NDVI	Pearson	0,670	NDVI	Spearman	0,668
PSRI	Pearson	0,658	RVI	Spearman	0,668
ACI	Pearson	0,656	RT	Spearman	0,660
NDPI	Pearson	0,654	SIPi	Spearman	0,658
SIPi	Pearson	0,651	MSI	Spearman	0,647
Ctr2	Pearson	0,648	NDPI	Spearman	0,645
CR1725	Pearson	0,644	NDII	Spearman	0,639
NPCI	Pearson	0,640	NDMI	Spearman	0,639
SRPI	Pearson	0,632	NPCI	Spearman	0,636
GGFN	Pearson	0,628	SRPI	Spearman	0,636
DSWI5	Pearson	0,627	NDWI	Spearman	0,635
MSI	Pearson	0,624	PSRI	Spearman	0,633
RVI	Pearson	0,619	GGFN	Spearman	0,623
NDII	Pearson	0,616	Ctr2	Spearman	0,619
NDMI	Pearson	0,616	GRatio 1	Spearman	0,617
mND705	Pearson	0,609	ACI	Spearman	0,615
LCI	Pearson	0,605	REP (Deriv)	Spearman	0,614
NDWI	Pearson	0,594	mND705	Spearman	0,613
PSNDc	Pearson	0,588	CR1725	Spearman	0,595
RVSI	Pearson	0,576	LCI	Spearman	0,595
WBI	Pearson	0,571	PSNDc	Spearman	0,592
PRI	Pearson	0,568	PRI	Spearman	0,591
SIXI	Pearson	0,557	WBI	Spearman	0,581
GR1890	Pearson	0,553	NDNI	Spearman	0,568
Ctr1	Pearson	0,551	ARI	Spearman	0,566
GRatio 1	Pearson	0,538	SIXI	Spearman	0,560
ARI	Pearson	0,538	RVSI	Spearman	0,550
REP (Deriv)	Pearson	0,529	GR1890	Spearman	0,535
NDNI	Pearson	0,514	Ctr1	Spearman	0,531
GRatio 2	Pearson	0,487	GRatio 2	Spearman	0,518
REP (Lin)	Pearson	0,345	REP (Lin)	Spearman	0,345
NDLI	Pearson	0,361	NDLI	Spearman	0,421
CR970	Pearson	0,345	CR970	Spearman	0,345
GP	Pearson	0,287	GP	Spearman	0,282
CR1350	Pearson	0,234	GR1140	Spearman	0,281
NPQI	Pearson	0,233	CR1350	Spearman	0,234
GR1140	Pearson	0,179	EGFN	Spearman	0,200
EGFN	Pearson	0,143	NPQI	Spearman	0,151
LCA	Pearson	0,128	LCA	Spearman	0,136
CAI	Pearson	0,114	CAI	Spearman	0,041
MCARI	Pearson	0,010	MCARI	Spearman	0,011

Die Abbildung 5.29 zeigt die signifikanten Korrelationen zwischen dem DSWI5 bzw. CR1725 und dem Arsen- bzw. Chromgehalt der Pflanze bei Rohrglanzgraspflanzen der Gefäßversuchsreihe 2007 in dem Jahr 2008. Am Beispiel des DSWI5 ist eine negative Korrelation zu erkennen. Je höher die DSWI5-Werte, desto geringer der Arsengehalt in der Pflanze. Bei der Tiefe der CR-Bande um 1725 zeigt sich eine positive Abhängigkeit zu den Schwermetallen.

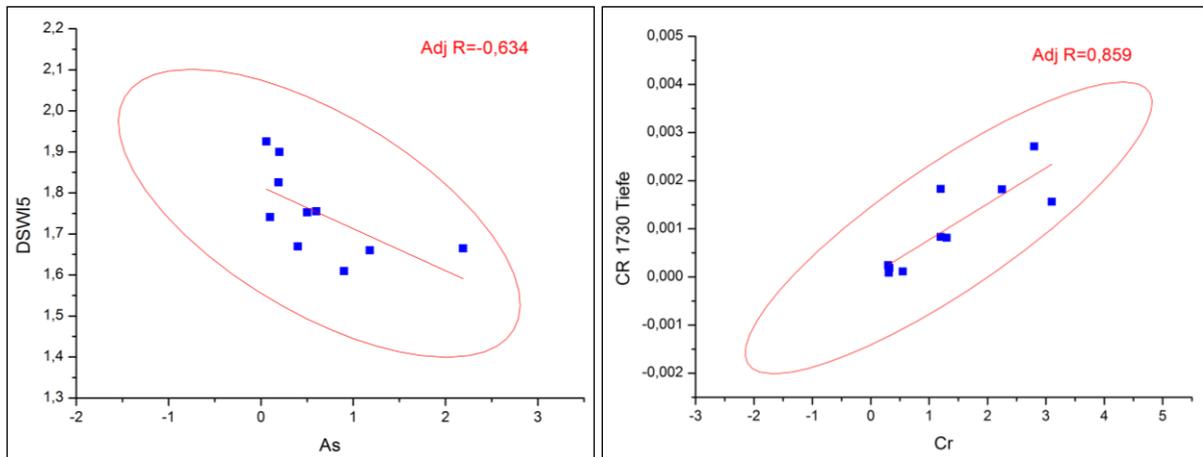


Abbildung 5.29: Streumatrix zwischen dem DSWI5 und dem Schwermetallgehalt As [mg/kg] der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 bei Rohrglanzgraspflanzen (links) und Streumatrix zwischen der Bandentiefe der CR1725 und dem Schwermetallgehalt Cr [mg/kg] der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 bei Rohrglanzgraspflanzen (rechts).

Ebenso stehen die Methoden in Beziehung zu den Nährstoffgehalten. Bestimmend sind hier einerseits einige Pigmentindizes und die REP (deriv) und andererseits Biochemieindizes (Tabelle Anh. 21, Tabelle Anh. 22).

5.4.3.2 Feldversuch

Im zweiten Schritt werden die Daten des Feldversuchs ausgewertet, um die Methoden auf ihre Wirksamkeit mit zusätzlichen Faktoren zu testen. Hierbei werden nur die hochsignifikanten Methoden zum Schwermetallgehalt an den Spektraldaten angewandt. Bestätigend zu den hohen Abhängigkeiten im Gefäßversuch zeigen sich bei der CR1725-Methode die höchsten Korrelationen im Feld (Abbildung 5.30). Einige andere Methoden wie z.B. der GRatio 1 und der RVSI weisen ebenfalls signifikante Beziehungen zu den Schwermetallanalysen der Messpunkte auf. Insgesamt sind die Zusammenhänge zwischen den Parametern etwas geringer, die Zahl der mittel- bis hochsignifikanten Methoden ist deutlich geringer (Tabelle 5.11, Tabelle Anh. 19, Tabelle Anh. 20).

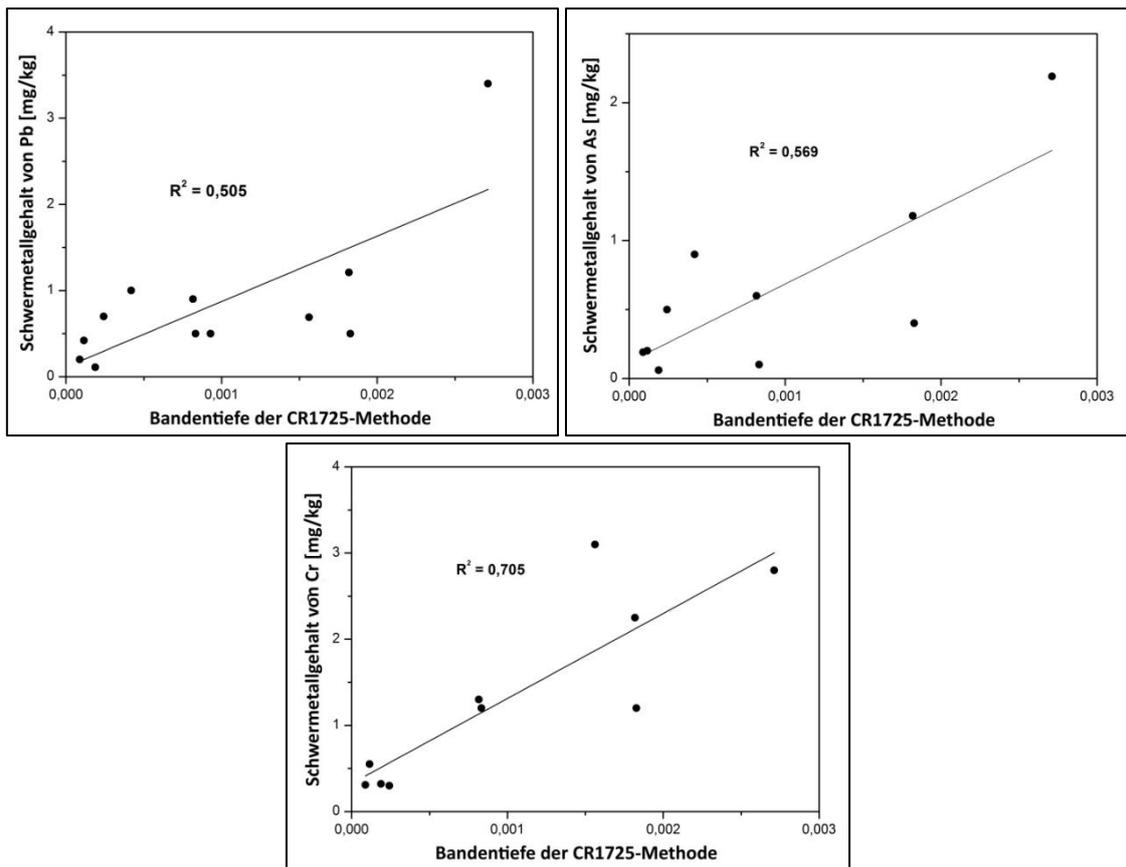


Abbildung 5.30: Scattermatrix zwischen der Bandentiefe CR1725 und dem Schwermetallgehalt Pb, As und Cr (von links nach rechts) der Messpunkte der HyMap-Kampagne 2009 der Rohrglanzgraspflanze.

Insgesamt zeigt sich die CR1725-Methode deutlich robuster als die anderen Methoden. Bei allen untersuchten Schwermetallen ist eine positive Abhängigkeit zu den Methodenwerten festzustellen. Bei einzelnen Schwermetallen sowie Arten ist eine höhere Korrelation zu der CR1725 zu finden, der gemittelten Wert liegt mit $R = 0,479$ tiefer. Einige Methoden wie der NDVI zeigen im Feld eine deutlich geringere Korrelation zu den Schwermetallen. Dies lässt auf einen Einfluss von mehreren Faktoren auf die Methodenwerte schließen (Multikorrelation mit gleichrangigen Faktoren). Eine Auswertung der Eignung der Methoden im Gefäßversuch und Feld wird im nachfolgenden Abschnitt 5.5 „Proportionalitätsfaktor“ beschrieben.

Tabelle 5.11: Mittlerer absoluter Korrelationskoeffizient der Spektralmethoden (Auswahl) und der Schwermetallgehalte (Cr, Cu, Hg, Ni) der Messpunkte von 2009 der Brennessel und des Rohrglanzgras.

Methode	Korrelationskoeffizient	BR			RGG			MW
		Cr	Cu	Hg	Cr	Cu	Ni	
CR1730	Spearman	0,429	0,600	0,543	0,567	0,452	0,286	0,479
GRatio 1	Spearman	0,000	0,257	0,600	0,650	0,762	0,107	0,396
RVSI	Spearman	0,321	0,486	0,143	0,633	0,310	0,393	0,381
NDNI	Spearman	0,000	-0,257	-0,543	-0,617	-0,310	-0,179	0,317
ARI	Spearman	-0,036	0,257	0,600	0,667	0,452	-0,321	0,270
NDPI	Spearman	-0,214	0,371	0,657	0,351	0,216	0,214	0,266
DSWI5	Spearman	0,286	-0,429	-0,257	-0,433	-0,619	-0,107	0,260
NPCI	Spearman	-0,214	0,371	0,638	0,383	0,286	0,036	0,250
SRPI	Spearman	0,214	-0,371	-0,600	-0,383	-0,286	-0,036	0,244
PSRI	Spearman	-0,357	0,429	0,371	0,450	0,071	0,393	0,226
NDWI	Spearman	0,214	-0,429	-0,371	-0,233	-0,762	0,250	0,222
MSI	Spearman	-0,286	0,429	0,257	0,167	0,571	0,143	0,213
NDII	Spearman	0,286	-0,429	-0,143	-0,201	-0,599	-0,143	0,205
PRI	Spearman	0,071	-0,371	-0,600	-0,268	-0,024	-0,018	0,202
GGFN	Spearman	0,214	-0,371	-0,657	-0,050	0,167	-0,500	0,200
PSNDc	Spearman	-0,036	0,257	0,600	0,083	0,190	0,071	0,194
ACI	Spearman	-0,607	0,257	0,543	0,500	0,214	0,250	0,193
WBI	Spearman	0,214	-0,429	-0,371	-0,067	-0,771	0,273	0,192
NDMI	Spearman	0,286	-0,429	-0,203	-0,133	-0,619	0,000	0,183
Ctr1	Spearman	0,214	0,029	0,543	0,183	0,143	-0,179	0,156
GRatio 2	Spearman	0,036	0,486	0,486	-0,317	0,238	0,000	0,155
SIPI	Spearman	0,679	-0,543	-0,257	-0,444	-0,119	-0,126	0,135
Ctr2	Spearman	-0,357	0,429	0,429	0,183	-0,071	0,143	0,126
mND705	Spearman	0,214	-0,429	-0,371	-0,100	0,000	-0,036	0,120
NDVI	Spearman	0,643	-0,371	-0,257	-0,444	-0,119	-0,126	0,112
RVI	Spearman	0,643	-0,371	-0,257	-0,467	-0,119	-0,071	0,107
LCI	Spearman	0,357	-0,314	-0,257	-0,183	0,071	-0,143	0,078
GR1890	Spearman	-0,107	-0,029	-0,543	0,283	0,024	0,000	0,062
REP (Deriv)	Spearman	0,120	-0,068	-0,370	0,193	-0,230	0,670	0,052
SIXI	Spearman	-0,571	0,257	0,200	0,050	-0,286	0,214	0,023
RT	Spearman	-0,821	0,314	0,257	0,233	-0,143	0,143	0,003

5.5 Proportionalitätsfaktor

Bei den Proportionalitätsfaktoren wird das Maß des einen zu den anderen ermittelten Parametern dargestellt. Dabei wird der Proportionalitätsfaktor zwischen dem Parameter x (z.B. Schwermetall) zu den anderen Parametern ermittelt. Die Formel 4.8, Formel 4.9 und Formel 4.10 im Abschnitt 4.9 Proportionalitätsfaktor beschreiben diesen Faktor.

Wenn eine Methode eine hohe Abhängigkeit zu z.B. Schwermetallen zeigt und geringe zu Chlorophyll und Nährstoffen, so ist der Wert des Faktors über 1. Je höher der Faktor, desto stärker ist die Einzelwirksamkeit der Methode. Im Gefäßversuch zeigen sich logische positive und negative Abhängigkeiten zwischen den Parametern. Diese Abhängigkeiten können im Feld durch andere Faktoren verändert werden, deshalb ist der Proportionalitätsfaktor ein Maß für die Eigenständigkeit und Robustheit der Methode. In der Tabelle 5.12 ist ein P_{SM} von 2,26 (Pearson)/ 2,19 (Spearman) bei dem GRatio1 zu erkennen. Wenn die Abhängigkeit zu den Schwermetallen im mehrjährigen Gefäßversuch sowie im Feldversuch in die Bewertung eingeht, ist die neu entwickelte Methode CR1725 am Wirksamsten für die Detektion von Schwermetallstress bei Pflanzen geeignet, obwohl sie nur den zweiten Rang (Pearson) beim P_{SM} belegt. In der Korrelationsanalyse der Daten der Gefäßversuchsreihen von 2007 und 2008 rangierte sie noch auf Platz 8 (Pearson). Die darüberstehenden Methoden z.B. NDVI

fallen durch ihre ebenso hohen Korrelationen zu den anderen Parametern einige Ränge abwärts (Multikorrelation mit gleichrangigen Faktoren). Weitere hohe Proportionalitätsfaktoren haben der GR1890, GRatio 2, der PSRI und nachfolgend die Wasserindizes wie der DSWI5. Es werden nur die Methoden mit einer Mindestkorrelation von $R = 0,550$ zu den Schwermetallen einbezogen.

Tabelle 5.12: Proportionalitätsfaktor für Schwermetall P_{SM} der Gefäßversuchsreihen 2007 und 2008 der untersuchten 5 Pflanzenarten.

Method	Korrelationskoeffizient	P_{SM}	Method	Korrelationskoeffizient	P_{SM}
GRatio 1	Pearson	2,26	GRatio 1	Spearman	2,19
CR1725	Pearson	2,13	GRatio 2	Spearman	2,03
GR1890	Pearson	2,12	GR1890	Spearman	2,00
PSRI	Pearson	1,73	CR1725	Spearman	1,62
GRatio 2	Pearson	1,59	DSWI5	Spearman	1,47
RVSI	Pearson	1,38	RVSI	Spearman	1,41
DSWI5	Pearson	1,27	MSI	Spearman	1,31
ACI	Pearson	1,24	NDMI	Spearman	1,30
RT	Pearson	1,22	NDII	Spearman	1,29
MSI	Pearson	1,17	PSRI	Spearman	1,29
NDMI	Pearson	1,13	NDWI	Spearman	1,25
NDII	Pearson	1,12	RT	Spearman	1,24
NDVI	Pearson	1,10	SIPI	Spearman	1,19
SIPI	Pearson	1,09	NDVI	Spearman	1,16
NDNI	Pearson	1,06	RVI	Spearman	1,16
NDPI	Pearson	1,03	WBI	Spearman	1,14
NDWI	Pearson	1,02	ACI	Spearman	1,10
NPCI	Pearson	0,99	PRI	Spearman	1,09
PRI	Pearson	0,98	NDNI	Spearman	1,09
WBI	Pearson	0,98	NDPI	Spearman	1,02
Ctr2	Pearson	0,97	NPCI	Spearman	1,01
SRPI	Pearson	0,94	SRPI	Spearman	1,01
RVI	Pearson	0,91	Ctr2	Spearman	0,98
GGFN	Pearson	0,88	GGFN	Spearman	0,97
ARI	Pearson	0,86	mND705	Spearman	0,95
PSNDc	Pearson	0,84	LCI	Spearman	0,93
LCI	Pearson	0,84	REP (Deriv)	Spearman	0,92
mND705	Pearson	0,83	PSNDc	Spearman	0,90
Ctr1	Pearson	0,80	ARI	Spearman	0,87
SIXI	Pearson	0,77	SIXI	Spearman	0,86
REP (Deriv)	Pearson	0,69	Ctr1	Spearman	0,80

Bei dem Parameter Chlorophyll im Vergleich zu den anderen Elementen sind der ARI sowie der Ctr1 mit hohen Faktoren (P_{CHL}) zu nennen. Einige Methoden fallen bei der Untersuchung raus, wenn sie Korrelationen unter $R = 0,750$ zu dem Parameter haben und somit grundsätzlich nicht in Betracht kommen (Tabelle 5.13).

Für die Nährstoffbestimmung im Gefäßversuch kann über den Proportionalitätsfaktor P_{NS} der NDLI als effizienteste Methode bestimmt werden. Insgesamt sind nur wenige Methoden signifikant korrelativ (mind. $R = 0,450$) zu den Nährstoffen (Tabelle 5.13).

Tabelle 5.13: Proportionalitätsfaktor für Chlorophyll P_{CHL} und für Nährstoffe P_{NS} der Gefäßversuchsreihen 2007 und 2008 der untersuchten 5 Pflanzenarten.

Methode	Korrelationskoeffizient	P_{CHL}	Methode	Korrelationskoeffizient	P_{CHL}
ARI	Pearson	1,66	Ctr1	Spearman	1,72
Ctr1	Pearson	1,56	GGFN	Spearman	1,69
PSNDc	Pearson	1,49	ARI	Spearman	1,67
NDPI	Pearson	1,49	NPCI	Spearman	1,63
NPCI	Pearson	1,49	SRPI	Spearman	1,63
SRPI	Pearson	1,48	PSNDc	Spearman	1,62
mND705	Pearson	1,41	NDPI	Spearman	1,62
GGFN	Pearson	1,41	mND705	Spearman	1,62
Ctr2	Pearson	1,38	Ctr2	Spearman	1,59
LCI	Pearson	1,34	LCI	Spearman	1,52
REP (Deriv)	Pearson	1,32	SIXI	Spearman	1,48
SIXI	Pearson	1,30	REP (Deriv)	Spearman	1,44
RVI	Pearson	1,22	RVI	Spearman	1,38

Methode	Korrelationskoeffizient	P_{NS}	Methode	Korrelationskoeffizient	P_{NS}
NDLI	Pearson	1,703	NDLI	Spearman	1,536
REP (Deriv)	Pearson	1,061	NDNI	Spearman	0,942
NDNI	Pearson	0,979	SIXI	Spearman	0,751
SIXI	Pearson	0,978	REP (Deriv)	Spearman	0,726
LCI	Pearson	0,869	Ctr1	Spearman	0,675
Ctr1	Pearson	0,768	LCI	Spearman	0,670
PSNDc	Pearson	0,766	PSNDc	Spearman	0,638

5.6 Ergebnisse der Übertragung auf flächenhafte Daten

Die Übertragung der gewonnenen Ergebnisse auf abbildende Fernerkundungsdaten und die damit verbundene Möglichkeit zur flächenhaften Darstellung ist ein wichtiges Ziel dieser Forschungsarbeit. Die Implementierung der signifikantesten Methode CR1725 auf hyperspektrale Flugzeugdatensätze ist abhängig von der räumlichen und spektralen Auflösung. Der HyMap-Sensor besitzt 126 Kanäle, im Bereich der Bande um 1725 nm 6 Kanäle und hat gegenüber ca. 50 Kanälen bei dem Feldspektrometer eine geringere spektrale Auflösung. Um eine robuste Methode zu entwickeln, wurden in Abschnitt 5.2.3

Aufbau einer Spectral Library und Spektralsimulation“ die Spektren auf diesen Datensatz simuliert. Die erfolgreiche Umsetzung des Algorithmus für Schwermetallstress bei Pflanzen konnte auch bei den HyMap-Daten von 2008 und 2009 getestet werden. Es zeigt sich bei der digitalen Bildverarbeitung bzw. Spektralanalyse eine ähnlich ausgeprägte Bande mit einer maximalen Tiefe von 0,01 bei den Spektral- bzw. flächenhaften Daten. Die Lage der Bande orientiert sich bei den FE-Daten an den Kanälen 87 (1723 nm) oder 88 (1735 nm), die Lage der Bande des mit einer hohen Kanalanzahl ausgestatteten Spektrometers liegt bei 1727 nm (Kanal 1378) (Abbildung 5.31). Mit Hilfe des AISA-Sensors konnte keine Übertragung

der Methode durchgeführt werden, da hier der Spektralbereich nur bis 1000 nm reicht. Es konnte somit nur die Mulde zur flächenhafte Auswertung genutzt werden.

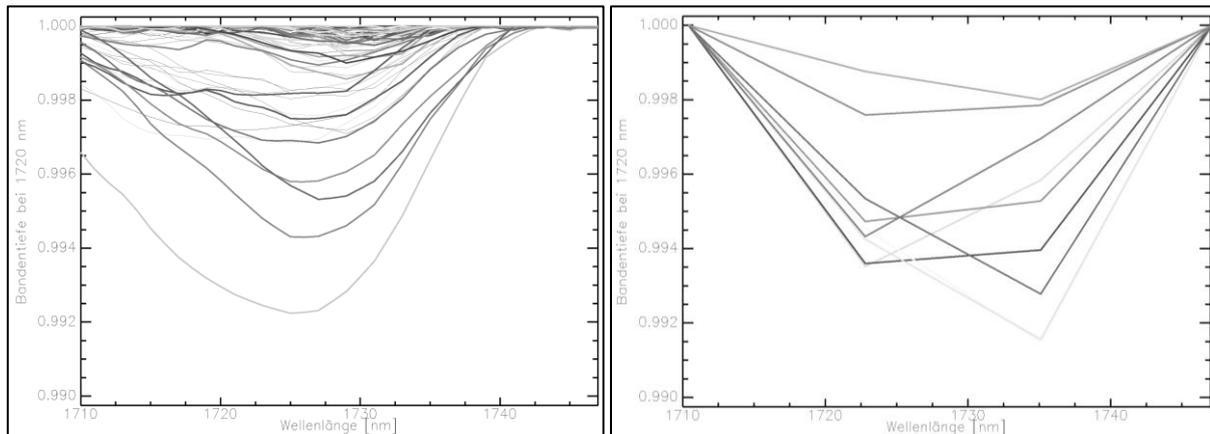


Abbildung 5.31: Bande im Spektralbereich von 1710 bis 1745 nm bei Feldspektren (links) und Spektren von HyMap 2003 (rechts) nach der CR1725-Methode für Auenpflanzen.

Die Ausgabe der Methodenergebnisse erfolgt als Grauwertbild mit den jeweiligen Werten der Bandentiefe für jedes Pixel (Abbildung 5.32). Mit Hilfe eines Schwellenwertstufenverfahrens können die Informationen des Bildes besser extrahiert und dargestellt werden. Die Festlegung der Schwellenwerte erfolgt über den Zusammenhang zwischen Bandentiefe und Kontaminationshöhe. Die Einteilung erfolgt in 6 Klassen im Farbraum von grün (geringe Belastung) über gelb bis rot (kritische Belastung) (Tabelle 5.14).

Tabelle 5.14: Schwellenwertstufen für die Bandentiefe der CR1725-Methode (Beispiel As).

Schadensklasse	1	2	3	4	5 (Grenzwert FMVO)	6
Bandentiefe	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006
Kontaminationshöhe (Beispiel As [mg/kg])	0,3	0,5	0,8	1,3	2	4
Kontaminationshöhe (Beispiel Cd [mg/kg])	0,1	0,2	0,4	0,7	1	2

Dabei wurden die Grenzwerte für Schwermetalle (As, Cd, Pb) der FMVO als Referenz für die Klasse 5 angewandt. Hierbei zeigte sich die Bandentiefe von 0,005 als Richtwert. Die Klassen 1-4 zeigen den Kontaminationsgrad von gering- bis mittelhoher Belastung mit Schwermetallen. Alle Bereiche der Klasse 6 besitzen Werte von höchster Schwermetallbelastung und somit eine toxikologische Gefährdung von Tier und Mensch. Folglich konnte ein Algorithmus für die quantitative Schwermetalldetektion und -parametrisierung für die Auenbereiche der Mulde und Elbe entwickelt werden. Der letzte Schritt für die spätere korrekte Interpretation der Ergebnisse ist die Festlegung einer Auenmaske. Dabei wurde der gesamte Bereich innerhalb des Hochwasserdeichs sowie ehemalige und aktive Altarmbereiche als Auengebiet abgegrenzt (Abbildung 5.32). Mittels einer Trennung von Wasserflächen über eine Klassifikation im infraroten Licht, konnten diese aus der Auenmaske eliminiert werden. Die Ergebnisse wurden als Layer in ein GIS-Projekt integriert, worin die Messpunkte mit den jeweiligen Analyseergebnissen verknüpft sind. Die Gestaltung des Layouts für eine Schadenskarte konnte im ArcMap durchgeführt werden (Abbildung Anh. 51).

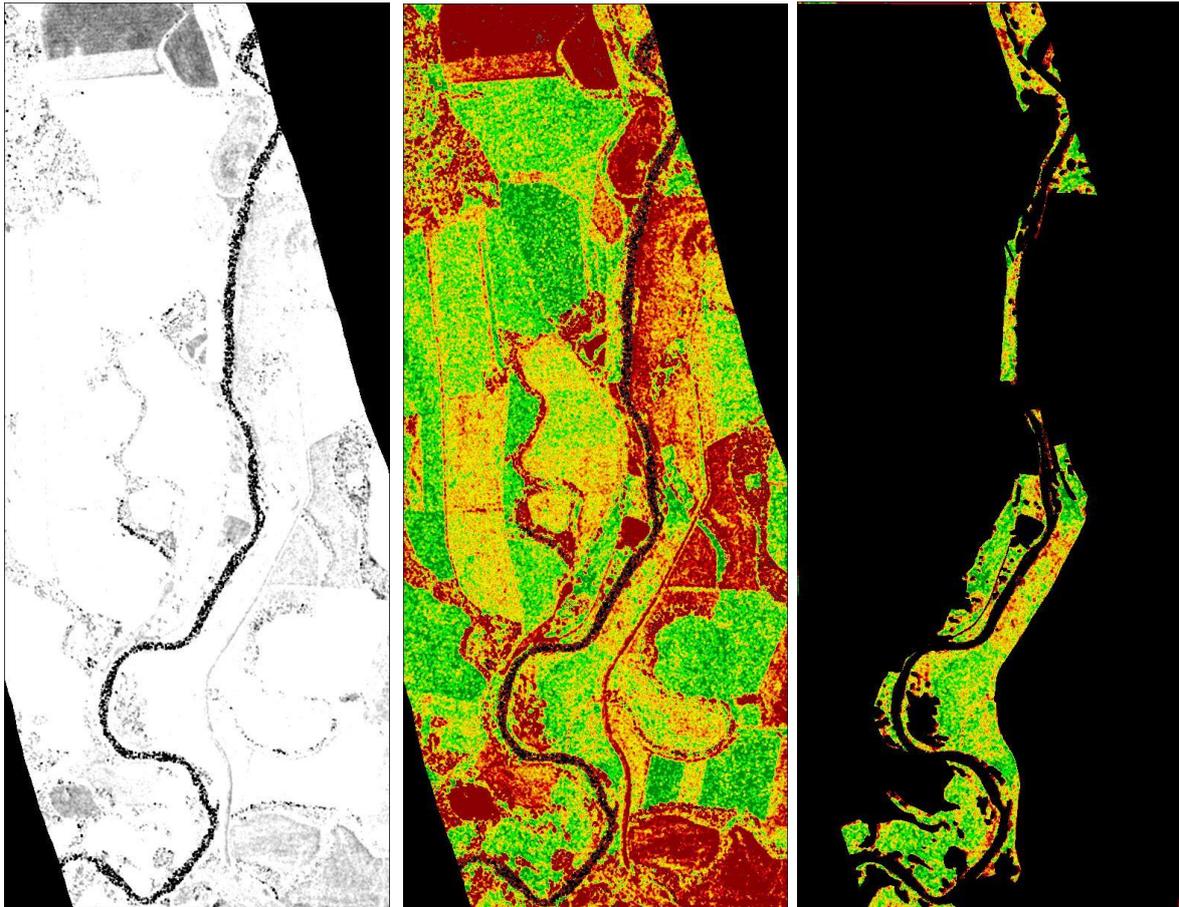


Abbildung 5.32: Graustufenbild (links), Schwellenwertstufenbild (mitte) und Schwellenwertstufenbild mit Maske für den Auenbereich (rechts) nach der Anwendung der CR1725-Methode des HyMap-Datensatzes von 2008.

Der Vergleich der flächenhaften mit den punkthaften Messdaten zeigt eine hohe Übereinstimmung der Kontaminationsgrade. Flußnahe Terrassen und Senkenbereiche besitzen insgesamt höhere Belastungen. Dieser Vergleich verifiziert die Bilddaten (Abbildung Anh. 50).

5.7 Nutzbarkeit des entwickelten Algorithmus

Der entwickelte Algorithmus ist auf seine Nachnutzung und Übertragung auf andere Auengebiete bzw. Gebiete mit Schwermetallbelastung zu testen. Im Rahmen der Arbeit wurden große Datenmengen verarbeitet und innerhalb der Prozesskette verwendet. Oft ist diese Möglichkeit für viele mögliche Nutzergruppen nicht gegeben. Einerseits stehen Forschergruppen zur Verifizierung und Übertragung auf andere Untersuchungsgebiete und andererseits Anwender zur Nachnutzung der Methodik im Blickpunkt. Mit dem in Abbildung 5.33 dargestellten kompakten Algorithmus werden verschiedene Entscheidungskriterien je nach Nutzer aufgezeigt. Während im Bereich I und II spektrometrische sowie analytische Daten mit unterschiedlich hohem Umfang bereitgestellt werden müssen, benötigt der Nutzer in Bereich III nur Fernerkundungsdaten zur Anwendung der Methode.

Im Bereich I (blau) werden die spektrometrischen Labordaten aus einem standardisierten Gefäßversuch nach der Methodenanwendung mittels Sensitivitätsanalyse auf ihre spektrale Variation zwischen den Kontaminationsgraden untersucht. Ist der Variationskoeffizient (Cv)

größer 0, werden die Methodenwerte mit den Schwermetallanalysen korreliert. Wird eine Korrelation von unter $R = 0,550$ ermittelt, sollte ein neuer/nächster Messzeitpunkt im Jahr genommen werden, um einen höheren Cv zu erreichen. Somit kann in diesem Bereich ein optimaler Aufnahmezeitpunkt für Mess- und Flugkampagnen zur Schwermetalldetektion ermittelt werden. Bei höherer Korrelation zu Schwermetallen wird die Abhängigkeit auch zu anderen Faktoren im Gefäßversuch bestimmt. Auch hier werden Schwellenwerte festgelegt um eine Multikorrelation mit gleichrangigen oder einem vorrangigen Faktor zu unterscheiden. In dieser Arbeit können für die letztgenannte Variante eine Nichtüberschreitung der Korrelation der Methodenwerte zum Chlorophyllgehalt von $R = 0,750$ und einem $R = 0,450$ zu den Nährstoffgehalten festgelegt werden. Diese bestimmten Methoden zeigen eine Wirksamkeit zur Trennung des Faktors Schwermetall von anderen Stressarten bei Pflanzen (hoher Proportionalitätsfaktor P_{SM}).

Im Bereich II (grün) werden mit Hilfe feldspektrometrischer Messungen und dem Einfluß vieler Faktoren auf die Pflanzen, die Methoden genutzt, die aus dem Gefäßversuch ermittelt werden. Hierbei wird ebenso mittels der Sensitivitätsanalyse sowie der Korrelation zu Schwermetallanalysen aus dem Feld das optimale Zeitfenster für Mess- und Fernerkundungskampagnen bestimmt. Ist eine Korrelation unter $R = 0,4$ zu den Schwermetallgehalten analysiert worden, wird eine Methode mit höherem Proportionalitätsfaktor gewählt (wenn möglich). Wird im Feld eine signifikante Abhängigkeit der Methoden zum Schwermetallgehalt von über $R = 0,4$ bestimmt, kann mittels dieser Methoden eine Trennung des Stressors von anderen durchgeführt werden.

Im Bereich III (gelb) wird der Nutzer angesprochen, der die Methoden anwenden möchte. Dabei ist die spektrale sowie die räumliche Auflösung von Interesse. Für die extrahierte Methode CR1725 der Arbeit ist der Spektralbereich von 1650 bis 1750 nm mit einer Mindestauflösung von 10 nm die Voraussetzung. Bei Nichterfüllung muss ein anderer Sensor genutzt werden. Ebenso ist eine hohe räumliche Auflösung für die Qualität der flächenhaften Auswertung von Vorteil. Hier wird eine Mindestauflösung von 10 m Pixelgröße empfohlen, da sonst die Geländemorphologie und somit die Möglichkeit zur Bestimmung hochbelasteter Bereiche durch die Mischpixel nicht trennbar ist.

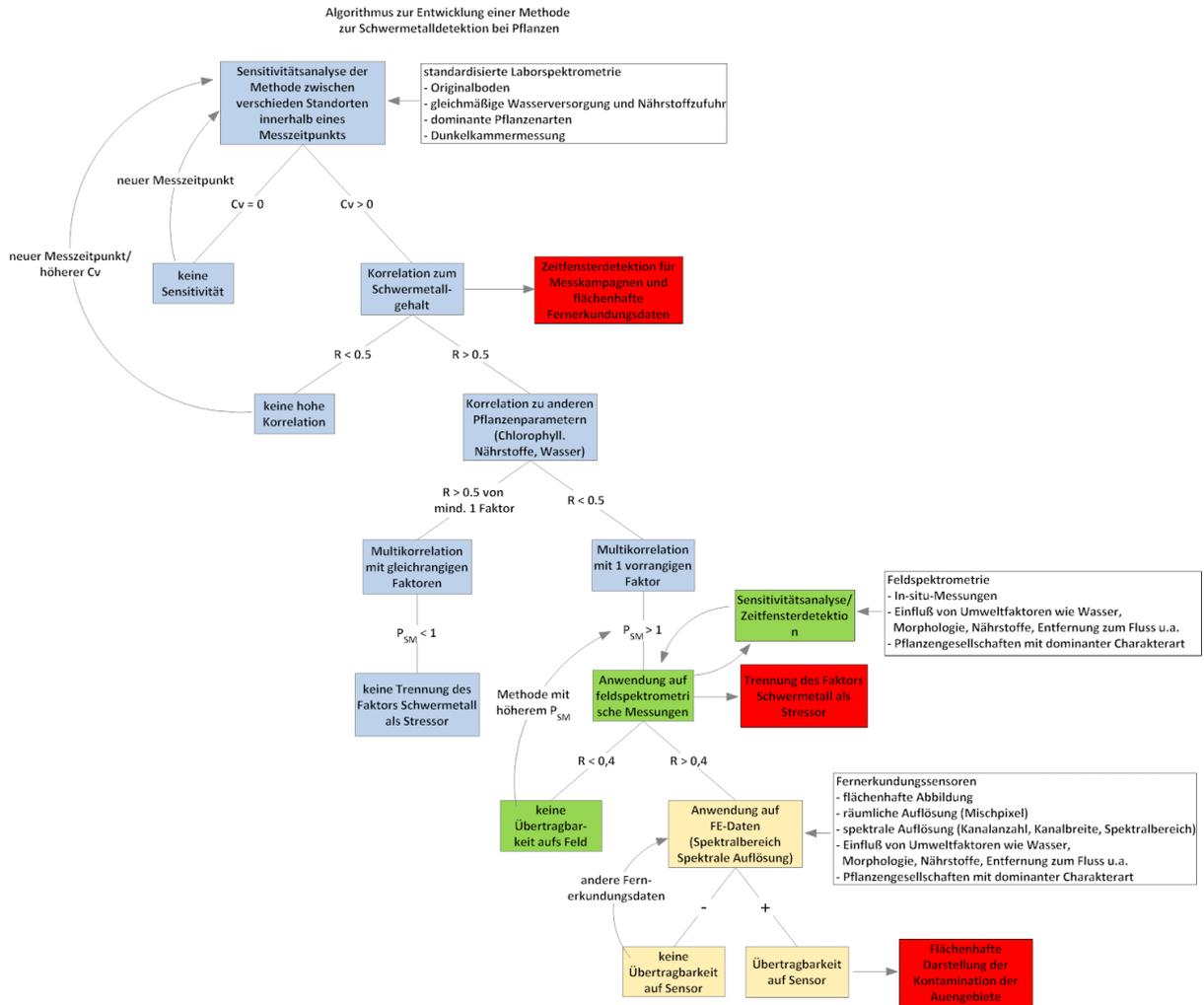


Abbildung 5.33: Algorithmus zur Ermittlung einer Methode zur Schwermetalldetektion bei Auenpflanzen.

6 Schlussbetrachtung und Ausblick

Die Innovation der vorliegenden Arbeit auf Basis einer dreijährigen Gefäßversuchsreihe besteht in der Entwicklung einer neuen Methode zur Bestimmung von Schwermetallstress bei Auenpflanzen sowie deren erfolgreiche Anwendung auf hyperspektrale Fernerkundungsdaten. Beispielhaft wurde eine Gefährdungsabschätzung für das Gebiet der Mulde anhand eines Schwellenwertverfahrens durchgeführt.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Analysen und Messungen kurz zusammengefasst, die Erfüllung der Zielstellungen betrachtet und Schlussfolgerungen gezogen werden.

6.1 Analyseergebnisse

Die Analyse der Schwermetallgehalte im Boden und in den Pflanzen zeigt die Relevanz und Aktualität der vorliegenden Forschungsarbeit. Voruntersuchungen von Rinklebe (2004) im Untersuchungsgebiet sowie die Auswertungen nach dem Hochwasser 2002 (Geller, et al., 2004) bestätigten dies schon vorab. Die morphologische Dreiteilung der Einheiten der Aue und somit auch die Abhängigkeit zu Bodenform, Wasser- und Nährstoffversorgung übertragen sich auch auf die Analysen der Schwermetallelemente. Die Niederterrassen, flussnahe Bereiche sowie die Rinnen mit langanhaltender hoher Wassersättigung haben eine deutlich höhere Kontamination (im Feld- und Gefäßreihenversuch) mit Schwermetallen als die Hochflächen. Es werden bei den Untersuchungen die Maßnahmenwerte für As und Hg sowie die Vorsorgewerte für Cd, Cr, Cu, Pb, Zn der BBodSchV deutlich überschritten (Holzwarth, et al., 2000). Bei Ni liegen die Werte geringfügig unter den Grenzwerten. Auch bei den Pflanzen konnte eine hohe Kontamination mit Schwermetallen festgestellt werden. Hier werden die Grenzwerte der FMVO der Elemente As, Cd und Pb überschritten (siehe Abschnitt 5.1 Analyseergebnisse“). In der bestehenden Gesetzgebung wurden keine weiteren Grenzwerte für Futtermittelpflanzen festgelegt. Eine eventuelle Ausweitung mit anderen toxischen Elementen ist zwingend notwendig, um den Belastungsstand der Auenregion quantitativ besser darstellen zu können.

Trotz der positiven Merkmale wie die Auswahl der naturnahen Bodenformen, der Vielzahl von Überschreitungen der Maßnahmenwerte bei den Schwermetallen sowie die dreijährige Ausrichtung der Gefäßversuchsreihe können einige Kritikpunkte angesprochen werden. Die teilweise geringen Unterschiede der Bodentypen auf hohem Kontaminationsniveau zeigen sich in einer nicht so klaren Abgrenzung der untersuchten Methodenwerte. Die Pflanzen sind ebenfalls relativ schwermetall-tolerant, so dass keine letalen Mengen für die Arten im Boden sind. Ein anderer Aspekt ist die Auswahl eines unbelasteten Kontrollbodens in der Nähe der Aue für eine Vergleichsuntersuchung. Dieser hatte eine unerwartet hohe Kontamination mit Schwermetallen. Bei der Betrachtung der Nährstoffe in Boden und Pflanze sind die Unterschiede in beiden Medien wiederzufinden. Die Typen Niederterrasse und Rinne haben eine leicht höhere Versorgung (5-15 %) mit Nährstoffen (P, K) in den Gefäßversuchsreihen 2007 und 2008 gegenüber den Hochflächen. Diese Grundbelastung der Böden kann eine Verzerrung der Ergebnisse in Bezug auf die Ursache des Stresses bewirken. Eine Möglichkeit einer anderen Herangehensweise an die Problematik ist ein standardisierter Versuch auf der Basis von Quarzsand (Bojakowska, et al., 1985; Liao, et al., 2003) mit einer injizierten Schwermetalllösung. Hierbei könnten noch stärkere Variationen experimentell bewirkt werden. Dagegen sprechen der Verlust des naturnahen Verhaltens der Böden und der Transfer in die Pflanzen.

Die Anzahl der Probenahme war aus Kapazitätsgründen begrenzt. Eine höhere könnte einige Fehlerquellen (statistische Ausreißer) minimieren. Durch die Möglichkeit der langjährigen Versuchsreihe konnte die anfängliche Verzögerung der Wachstumszeit und im weiteren Verlauf stark erhöhte Aufnahme der Pflanzen im Ersten Jahr, in den weiteren Jahren durch die Weiterführung der Versuche vernachlässigt werden.

Die Chlorophyllmessungen weisen einen typischen phänologischen Verlauf auf. Die SPAD-Werte sinken von 35 Anfang April auf 18 Ende August in den Jahren 2007 und 2008. Dabei treten entgegen der Annahme erhöhte SPAD-Werte bei den stärker belasteten Pflanzen auf. Eine Ursache könnte die nährstoffvariierte Grundbelastung sein. Auch CLEVERS et al. (2004) weisen darauf hin, dass das Spektrum von Grasland auch von der Bodenfeuchte, dem organischen Material sowie der Nährstoffversorgung abhängig ist und besser versorgte Standorte auch höhere Kontaminationslevel aufweisen. Über diese Beziehung konnten sie auch die negative Korrelation des Spektralsignals der Pflanzen zu dem Schwermetalllevel im Boden bestimmen. Damit konnte aber kein direkter Zusammenhang für eine spektrale Signalveränderung mit der Ursache Schwermetallbelastung ermittelt werden. Eine Methode zur Detektion von Schwermetallstress kann mit der vorliegenden Arbeit aufgezeigt werden. Im Feldversuch konnten bei vielen Proben grenzwertüberschreitende Werte bei den Schwermetallen festgestellt werden. Dabei sind einige Bereiche des Biosphärenreservats Mittlere Elbe und FFH-Gebiete an Mulde und Elbe betroffen und somit wird noch einmal die Aktualität und die naturschutzrechtliche Relevanz bestätigt. Auch hier bedingen sich aufgrund der morphologischen Einheiten die Nährstoffversorgung und der Chlorophyllgehalt positiv. Die krautigen Pflanzen zeigen gegenüber den Gräsern eine deutlich höhere Kontamination mit Schwermetallen. In Untersuchungen von VOGLER (1993) und Sauerbeck (1989) konnte eine durchschnittlich höhere Akkumulationsneigung von dikotylen gegenüber monokotylen Pflanzen nachgewiesen werden. Dieser Effekt wird auf eine Wurzel-Spross-Barriere der Gräser zurückgeführt (Sauerbeck, 1989). Weiterhin zeigen sich Unterschiede in dem Lignin (ca. 50 % weniger)- und Wassergehalt (ca. 10 % mehr) von zweikeimblättrigen gegenüber einkeimblättrigen Pflanzen. Da diese Analysen nicht für die Gefäßreihen zur Verfügung standen, konnten hierbei keine signifikanten Korrelationen mit den Schwermetallbelastungen getroffen werden. Hinsichtlich weiterer Untersuchungen besteht ein Bedarf an Analysen von Lignin, Protein und Cellulose als Parameter für Pflanzenstress. Neben einer höheren zeitlichen Auflösung des Feldversuchs wären noch weitere Gebiete mit differenzierter Nutzungsstruktur von Vorteil.

6.2 Ergebnisse der Spektraldaten

Die Spektralmessungen zwischen 2007 und 2009 in den Gefäßversuchsreihen und im Feldversuch bilden die Grundlage für die weiteren Schritte der Arbeit. Die nach einheitlichem Standard gemessenen Daten im Gefäßversuch werden mit Analysedaten korreliert, die vorliegenden Methoden getestet sowie eine flächenhafte Übertragung auf hyperspektrale Daten vorgenommen. Hierbei war die Gesamtabdeckung aller geomorphologischen Bereiche der Aue notwendig, um Variationen in den Umweltfaktoren zu haben (insbesondere Schwermetalle). Die Spektren weisen eine hohe Variabilität auf, wobei der Bereich des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarots die deutlichsten Unterschiede aufzeigen. Die stärkste Beeinflussung des Signals hat die allgemeine Seneszenz der Pflanze mit zunehmendem Fortschritt der Reifephase. Dabei erhöht sich der Bereich des roten Lichts zwischen 600 und 700 nm sowie die Form im Bereich des nahen Infrarots. Diese Veränderungen beruhen auf einer Abnahme des Chlorophyllgehalts (Horler, et al., 1983)

sowie auf zellstrukturellen Veränderungen im Bereich zwischen 750 und 1000 nm. Ebenso kommt es aufgrund einer geringeren Zufuhr an Wasser im Laufe des Jahres zu einer Erhöhung der Reflexion im Bereich der Wasserbanden des Pflanzenspektrums. Diese Variationen beweisen nur das phänologisch typische Verhalten der Vegetation. Bei arten- und standortgetrennter Betrachtung sind weitere Differenzierungen möglich. Es sind geringe Variationen im Bereich der Reflexionsschulter des nahen Infrarots zwischen den Mono- und Dikotylen (Form) sichtbar. Weitere Untersuchungen diesbezüglich können mit einer spektralen Datenbank (PhenoSpec) von Jung et al. (2008) vorgenommen werden und artenspezifisch betrachtet werden. Hierbei wird eine Ähnlichkeitsanalyse der Kurvenform zwischen den einzelnen Spektren durchgeführt. Zwischen den Bodentypen der Gefäßversuchsreihen gibt es relative Unterschiede in der Reflexionshöhe, wobei die höher belasteten Standorte (Gefäßreihe 2007 A, C und Gefäßreihe 2008 Br, WöNt) leicht über denen der weniger belasteten Standorte (Gefäßreihe 2007 B und Gefäßreihe 2008 WöKo, WöHf) liegen. Diese Abweichungen können durch eine geringe Besserversorgung der stärker kontaminierten Bereiche mit Nährstoffen auftreten und damit eine erhöhte Biomasseproduktion verursachen. Ebenso zeigten im Gefäßversuch 6 relevante Spektralbereiche (430-770, 910-1020, 1080-1200, 1260-1450, 1660-1950 und 2180-2300 nm) kontaminationsbedingte Veränderungen. Diese sind in deutlich geringerem Maße ausgeprägt als phänologischen Variationen. Genauere Spektralanalyseergebnisse werden im folgenden Abschnitt erläutert. Als wichtiges Nebenprodukt der Arbeit konnten viele Spektren einer *Spectral Library* zugeführt und mit Metadaten verknüpft werden. Damit können spektralorientierte Klassifikationen für die Vegetationsbereiche der Aue durchgeführt werden. Ebenso wurden die Spektren als verschiedene multi- und hyperspektrale Daten simuliert. Darunter die in der Arbeit verwendeten HyMap- und AISA-Daten. Dabei kann einerseits die Kanalanzahl als auch der spektrale Bereich der Daten simuliert werden. Von den 45 bekannten und neuen Methoden der Arbeit können bei HyMap 45 und bei AISA 27 angewendet werden. Zahlreiche signifikante Methoden (Wasser- und Biochemieindizes) fallen bei AISA aufgrund des zu geringen Spektralbereichs heraus. Um eine nicht allzu starke Verschiebung der Methodenreferenzkanäle zu bewirken, wird eine Auflösung von maximal 10 nm Kanalbreite als Empfehlung gegeben. Beim Feldversuch sind die Zeitpunkte für die Aufnahmen durch die Hochwasserdynamik auf Mai bis September beschränkt. Die oben beschriebenen Aussagen zu den 6 variablen Spektralbereichen, verursacht durch Umweltfaktoren, können auch bei den Feldmessungen festgestellt werden.

6.3 Entwicklung und Anwendung des Algorithmus und Statistikauswertung

Der zentrale Punkt der Arbeit ist, mit Hilfe von *Ground-Truth*-Daten (Analyse- und spektrometrische Messdaten) ein Verfahren zu entwickeln, das den durch Schwermetallbelastung im Boden verursachten Stress in der Pflanze detektiert und von anderen möglichen Umweltfaktoren trennt. Dabei muss sich dieses Verfahren auf seine Wirksamkeit im Vergleich zu bekannten Methoden beweisen. Die Entwicklung des Algorithmus ist ein Verfahren mit verschiedenen Arbeitsschritten. Er beginnt mit der Bestimmung der lokalen Extrema der vorverarbeiteten Spektraldaten. Bei den untersuchten Gefäßversuchsreihen zeigten sich 6 variierende Spektralbereiche (siehe Abschnitt 4.2 Bestimmung von lokalen Extrema und Selektion der Spektralbereiche“) zwischen den Spektren. Diesen wurden dann jeweils referierte Methoden zur Bestimmung von Pflanzenparametern zugeordnet. Einige Bereiche weisen eine deutlich höhere Anzahl an Untersuchungen durch verschiedene Autoren auf. In den Bereichen mit einer lückenhaften

bzw. nicht vorhandenen Methodenauswahl wurden verschiedene Verfahren entwickelt. Dabei wurden 7 Methoden mittels einfacher Bestimmung der Reflexionshöhe, Ratios oder *Continuum Removal* erzeugt. Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse konnte eine allgemeine Plausibilitätskontrolle für die Anwendung der Methoden getestet werden. Hierbei konnte allen 45 Methoden eine Veränderung zwischen den Messzeiträumen und den Kontaminationsgraden nachgewiesen werden. Absolute Veränderungen im Bereich jeder einzelnen Methode können nur durch weiterführende Recherchen in Hinsicht auf einen maximalen Schwankungsraum der jeweiligen Indexwerte bestimmt werden. Durch eine Zeitfensteranalyse im Vergleich zu den hydrologischen Verhältnissen und der Vegetationsperiode der Auenpflanzen der Methodenwerte konnte ein Zeitpunkt zur optimalen Schwermetalldetektion mittels Spektrometer oder Fernerkundungssensor ermittelt werden. An drei Messzeitpunkten (Ende April-Mitte Mai, Ende Juni und Mitte Juli) zeigten sich die höchsten Variationen in der Veränderung der Methodenwerte im Mittel (siehe Abschnitt 5.3 „Sensitivitätsanalyse“).

Die Methodenwerte werden im Bereich der Korrelationsanalyse mit den Daten aus der Analyse und dem Feld verglichen. Mit Hilfe von 2 Korrelationskoeffizienten (Pearson, Spearman) konnten signifikante Beziehungen zu dem relativen Chlorophyllgehalt hergestellt werden. Insbesondere die Pigmentindizes und die REP-Methode (1. Ableitung) zeigen hohe Korrelationen, führend ist der Ableitungsindex GGFN mit $R = 0,876$ beim Spearman Korrelationskoeffizienten. Mittelhohe Beziehungen zeigen dagegen die wasser- und biochemiebestimmenden Methoden.

Im Bereich der Schwermetallaffinität treten neben Pigmentindizes (NDVI) die Wasserindizes insbesondere beim Spearman-Koeffizient auf. Von den neu entwickelten Methoden hat die CR1725 die höchsten Zusammenhänge zu den Schwermetallen (Elemente gemittelt). Das Potential der Methode zeigt sich in Analysen des Feldversuchs, in denen sie mit dem GRatio1 und dem RVSI die höchsten Korrelationen aufweist. Die eigentliche Aussage über die Effektivität der Methode CR1725 kann durch den Proportionalitätsfaktor P_{SM} getroffen werden. Hierbei wurde die Einzelwirksamkeit (Multikorrelation mit einem vorrangigen Faktor) bestimmt, in dem ein Faktor (Schwermetall) zu anderen aufgenommenem Daten (Chlorophyll, Nährstoffe) in Proportion gesetzt wurde. Insgesamt unter Einbeziehung der Korrelationsanalysen aus dem Gefäß- sowie Feldversuch und dem hohen Proportionalitätsfaktor ($P_{SM} = 2,13$) zeigt sich die CR1725-Methode als wirksamstes Verfahren zur Detektion von Schwermetallbelastungen und den dadurch verursachten Stresseinwirkungen auf die Pflanze. Der optimale Aufnahmezeitpunkt für Feld- und FE-Sensormessungen ist das Zeitfenster III (Ende Juli). Die Anwendung und Nachnutzung wird im Abschnitt 5.7 „Nutzbarkeit des entwickelten Algorithmus für verschiedene Nutzergruppen“ aufgezeigt.

6.4 Fernerkundungsdaten

Die Übertragung der Ergebnisse der punkthaften Daten der Gefäßversuchsreihen auf die Untersuchungsgebiete ist aufgrund der eingeschränkten spektralen Auflösung des AISA-Sensors nur im Muldegebiet mittels HyMap-Daten möglich. Der Zeitpunkt der Daten von 2008 bzw. 2009 liegt im erweiterten Zeitfenster III. Durch die Anwendung der CR1725 auf die Daten entstand ein Grauwertbild. Im Vergleich der Spektralsignatur der Feldspektren mit den Pixelwerten zeigte sich eine ähnliche Ausprägung der Bandentiefe der CR1725. Mittels eines Schwellenwertverfahrens werden die Grauwerte in Klassen eingeteilt. Hierbei ist eine gewisse Subjektivität des Betrachters gegeben. Durch eine Orientierung der Einteilung der

Schwellenwerte an die Grenzwerte der FMVO und einem Vergleich der Bandentiefen mit dem Kontaminationsgrad einzelner Schwermetallelemente konnte ein Schadensklassenbild für den Gesamtschwermetallgehalt erzeugt werden. Durch eine Maske für den Auenbereich der Mulde wurde die Information des Bildes hervorgehoben. Eine erzeugte Schadenskarte im GIS bietet dem Anwender einen Überblick über die Gesamtschwermetallkontamination in der Mulde. Gebiete mit den Klassen 5 und 6 besitzen ein hohes Potential zur Gefährdung der menschlichen Gesundheit. Über den Weg der Nahrungskette könnten erhöhte Schwermetallkonzentrationen den Menschen schädigen. Deshalb sollte hier ein eingeschränktes Nutzungsrecht für diese Flächen ausgewiesen werden.

In den oben beschriebenen zusammenfassenden Abschnitten können die in der Forschungsarbeit aufgestellten Ziele beantwortet werden.

- Bestimmung der aktuellen Schwermetallbelastung von Boden und Pflanze der Untersuchungsgebiete an der Elb- und Mulde mittels Analyseverfahren
- Analyse des spektralen Verhaltens von Auenpflanzen unter Schwermetallstress mittels spektrometrischen Messungen zu verschiedenen phänologischen Zeiträumen
- Normierung der stressinduzierten Belastungen an der Reflexionskurve durch Methoden zur Bestimmung von Vegetationsparametern
- Ermittlung von optimalen Zeitfenstern für spektrometrische Messungen und Aufnahmen von Fernerkundungsdaten in schwermetallbelasteten Auengebieten
- Korrelation zwischen dem physiologischen Zustand (Pigment-, Nährstoff- und Schwermetallgehalt) und den normierten Spektralmerkmalen der Pflanzen
- Algorithmentwicklung zur Detektion und Trennung von Schwermetallstress bei Pflanzen
- Übertragung des Algorithmus auf abbildende Fernerkundungsdaten (AISA, HyMap)
- Erstellung von thematischen Karten mit Schwermetallbelastungsstufen im Untersuchungsgebiet

Die kritische Diskussion zeigt den weiteren Forschungsbedarf in einigen Punkten und bildet weitere Hypothesen die im Ausblick stehen.

6.5 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen eine wirksame Methode für die Detektion von Pflanzenstress in den Elb- und Muldeauen. Diese sind auf ihre Reaktion in anderen belasteten Auensystemen weltweit zu testen. Dabei sollten hyperspektrale Daten zur Verfügung stehen, die ihren Spektralbereich im SWIR II haben. Eine große Chance besteht auch durch die Neuentwicklungen in der Sensortechnologie. Der deutsche EnMAP-Sensor ist ein hyperspektraler Satellit, der für den entwickelten Algorithmus ein ideales Instrument zur flächenhaften Kartierung der belasteten Auengebiete bietet. Weiterhin sind die pflanzenphysiologischen und spektralen Zusammenhänge bei Schwermetallstress zu untersuchen. Die in der Literatur beschriebenen Prozesse bei Schwermetallbelastung von Pflanzen, wie z.B. die Veränderung des Ligningehalts (Stresslignin) als Begründung für das spektrale Verhalten im Bereich um 1725 nm, sind mit Experten zu diskutieren (Prof. Humbeck, Halle; Prof. Küpper, Konstanz). Dabei wird eine Kooperation mit der Abteilung Pflanzenphysiologie (Prof. Humbeck) des Instituts für Biologie angestrebt. Mit Hilfe von neuen Gefäßversuchsreihen und den gewonnenen Erfahrungen können weitere

Untersuchungen folgen, in denen eine erweiterte Zahl von Parametern (Lignin, Cellulose, usw.) bestimmt werden sollten. Hierbei ist die Ursache für die Veränderung der Bande im Bereich von 1725 nm zu untersuchen. Eine spezialisierte Produktentwicklung für verschiedene Anwender im Bereich von Ökologie, Landwirtschaft und Forschung durch einen automatisierten Algorithmus, angepasst an diverse gängige hyperspektrale Fernerkundungsdaten, ist geplant. Durch eine Implementierung in ein Java-Applet ist eine einfache Umgebung zur Nutzung des Algorithmus möglich. Innerhalb der Fachgruppe Geofernerkundung und Kartographie ist dies geplant.

7 Literaturverzeichnis

- Alloway, B. J. (1999). *Schwermetalle in Böden. Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- Altermann, M., Rosche, O., Wiechmann, H., & Eisenmann, V. (2001). *Zustand und Eigenschaften der Auenböden sowie deren ökologische Eigenschaften nach Deichrückbau*. Projektbericht Rückgewinnung von Retentionsflächen und Altauenreaktivierung an der Mittleren Elbe in Sachsen-Anhalt, Halle/Saale, Hamburg.
- Apan, A., Held, A., Phinn, S., & Markley, J. (2004). Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. *International Journal of Remote Sensing* (25 (2)), S. 489-498.
- Arkimaa, H. (2002). *Environmental studies using hyperspectral airborne AISA data in the mining area of Pyhäsalmi, Finland*. GTK/RS/2002/3, Geological Survey of Finland.
- Bammel, B. H., & Birnie, R. W. (1994). Spectral reflectance response of big sagebrush to hydrocarbon-induced stress in the Bighorn Basin, Wyoming. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (60), S. 87-96.
- Baranoski, G. G., & Rokne, G. J. (2005). A practical approach for estimating the red edge position of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing* (26 (3)), S. 503-521.
- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limitations of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* (35), S. 161-173.
- Baret, F., Jacquemoud, S., Leprieur, C., & Guyot, G. (1990). Are the spectral shifts an operational concept? Critical analysis of theoretical and experimental results. *Proceeding of the Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop* (S. 58-71). Pasadena: JPL Publication 90-54.
- Barnes, J. D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira, S., & Davison, A. W. (1992). A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental Experimental Botany* (2), S. 85-100.
- Baroni, F., Boscagli, A., DiLella, L. A., Protano, G., & Riccobono, F. (2004). Arsenic in soil and vegetation of contaminated areas in southern Tuscany (Italy). *Journal of geochemical exploration* (81), S. 1-14.
- Becker, A., & Grunewald, U. (2003). Disaster management - flood risk in Central Europe. *Science* (300 (5622)), S. 1099.
- Berry, W. L., & Wallace, A. (1981). Toxicity: the concept and relationship to the dose response curve. *Journal of Plant Nutrition* (3), S. 13-19.
- Beuge, P., Greif, A., Hoppe, T., Kluge, A., Martin, M., Mosler, U., et al. (1999). *Die Schwermetallsituation im Muldesystem* (Bd. 1 bis 3). Freiberg, Hamburg.
- Blackburn, G. A. (1998). Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing* (19 (4)), S. 657-675.
- Blume, H. P. (2004). *Handbuch des Bodenschutzes: Bodenökologie und Bodenbelastung; vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen* (3. Aufl.). Landsberg am Lech: ecomed.
- BNatSchG. (2002). *Bundesnaturschutzgesetz vom 25. März 2002*. BGBl. I S. 1193.
- Bojakowska, I., & Kochany, J. (1985). Studies on the removal of heavy metals from sludges by leaching and uptake by plants. *Plant and Soil* (86), S. 299-302.
- Bonham-Carter, G. F. (1988). Numerical procedures and computer program for fitting an inverted Gaussian model to vegetation reflectance data. *Computer & Geoscience* (14 (3)), S. 339-356.

- Boochs, F., Kupfer, G., Dockter, K., & Kühbauch, W. (1990). Shape of the red edge as vitality indicator for plants. *International Journal of Remote Sensing* (11 (10)), S. 1741-1753.
- Brehm, J., & Meijering, M. P. (1990). *Fließgewässerkunde : Einführung in die Limnologie der Quellen, Bäche und Flüsse* (2 Ausg.). Heidelberg: Quelle & Meyer Verlag.
- Brunn, A., Busch, W., Dittmann, C., Fischer, C., & Vosen, P. (2003). Monitoring Mining Induced Plant Alteration and Change Detection in a German Coal Mining Area using Airborne Hyperspectral Imagery. *Proceedings of the US EPA 'Spectral Remote Sensing of Vegetation' conference*. Las Vegas.
- Brunold, C., Rügsegger, A., & Brändle, R. (1996). *Stress bei Pflanzen*. Bern-Stuttgart-Wien: Verlag Paul Haupt.
- Carter, G. A. (1994). Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing* (15 (3)), S. 697-703.
- Carter, G. A., Dell, T. R., & Cibula, W. G. (1996). Spectral reflectance characteristics and digital imagery of a pine needle blight in the southeastern United States. *Canadian Journal of Forest Research* (26), S. 402-407.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jaquemoud, S., & Gregoire, J. M. (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment* (77), S. 22-33.
- Chevrel, S., Belocky, R., & Grösel, C. (2002). Monitoring and assessing the environmental impact of mining in Europe using advanced Earth Observation techniques - MINEO, First results of the Alpine test site. *Proceedings of the 16th International Conference Informatics for Environmental Protection*. Wien.
- Clark, R. N., & Roush, T. L. (1984). Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research* (89), S. 6329-6340.
- Clark, R. N., King, T. V., & Gorelick, N. S. (1987). Automatic continuum analysis of reflectance spectra. *Proceedings of 3rd AIS workshop*, (S. 138-142). Pasadena.
- Clevers, J. G., & Kooistra, L. (2003). Assessment of heavy metal contamination in river floodplains by using the red-edge index. *Proceeding of the 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*. Hersching.
- Clevers, J. G., De Jong, S. M., Epema, G. F., Van der Meer, F. D., Bakker, W. H., Skidmore, A. K., et al. (2002). Derivation of the red edge index using the MERIS standard band setting. *International Journal of Remote Sensing*, (23 (16)), S. 3169-3184.
- Clevers, J., Kooistra, L., & Salas, E. (2004). Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data. *International Journal of Remote Sensing* (25 (19)), S. 3883-3895.
- Cole, M. M., & Smith, R. F. (1984). Vegetation as Indicator of Environmental Pollution. *Transactions of the Institute of British Geographers* (New Series 9 (4)), S. 477-493.
- Collins, W. (1978). Remote sensing of crop type and maturity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing of Environment* (44), S. 43-55.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., & Peterson, D. L. (2001). Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sensing of Environment* (76), S. 349-359.
- Curran, P. J., Windham, W. R., & Gholz, H. L. (1995). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. *Tree Physiology* (15), S. 203-206.

- Curtiss, B., & Maecher, A. G. (1991). Changes in Forest canopy reflectance associated with chronic exposure to high concentrations of soil trace metals. *Proceedings of eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*. Denver.
- Dankers, R., & Feyen, L. (2008). Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* (113).
- Datt, B. (1999). Visible/ near infrared reflectance and chlorophyll content in eucalyptus leaves. *International Journal of Remote Sensing* (20 (14)), S. 2741-2759.
- Daughtry, C. T., Hunt Jr., E. R., Doraiswamy, P. C., & McMurtrey III, J. E. (2005). Remote sensing the spatial distribution of crop residues. *Agronomy Journal* (97), S. 864-871.
- Daughtry, C. T., Nagler, P. L., Kim, S. M., & McMurtrey III, J. E. (1996). Spectral reflectance of soils and crop residues. In A. C. Davies, & P. Williams, *The future waves* (S. 505-510). Chichester: NIR Publications.
- Daughtry, C. T., Walthall, C. L., Kim, M. S., Brown de Colstoun, E., & McMurtrey III, J. E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* (74), S. 229-239.
- Davis, R. D., & Coker, E. (1980). *Cadmium in agriculture, with special reference to the utilization of sewage sludge on land*. Technical Report TR 139, The Water Research Centre, Medmenham.
- Dawson, T. P., & Curran, P. J. (1998). A new technique for interpolation the reflectance red edge position. *International Journal of Remote Sensing* (19 (11)), S. 2133-2139.
- Degenhardt, B. (2000). *Wachstum und physiologisches Verhalten von Zea mays bei multiplem Streß unter besonderer Berücksichtigung des Wurzelsystems*. Dissertation, Würzburg.
- Degenhardt, B., & Gimmler, H. (2000). Cell wall adaptations to multiple environmental stresses in maize roots. *Journal of Experimental Botany* (51 (344)), S. 595-603.
- DGJ. (2004). Von Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch: dgj.de abgerufen
- Dunagan, S. C., Gilmore, M. S., & Varekamp, J. C. (2007). Effects of mercury on visible/near-infrared reflectance spectra of mustard spinach plants (*Brassica rapa* P.). *Environmental Pollution* (148 (1)), S. 301-311.
- DWD. (2009). Von Deutscher Wetterdienst: www.dwd.de abgerufen
- DWD. (1997-1999). *Monatlicher Witterungsbericht*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.
- Epema, G. F., Kooistra, L., & Wanders, J. (2003). Spectroscopy for the assessment of soil properties in reconstructed river floodplains. *Proceedings of the 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*. Hersching.
- Erasmi, S. (2002). *Analyse spektroradiometrischer in situ Messungen als Datenquelle für die teilflächenspezifische Zustandsbeschreibung von Winterweizenbeständen*. Dissertation, Göttingen.
- Eyers, R. D., & Mills, J. P. (2005). Subsidence Detection Using Integrated Multi Temporal Airborne Imagery. *The International Archives of the Photogrammetry*, 34 (3). Istanbul.
- FFH-Richtlinie. (1992). *Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen*. 92/43/EWG.
- Filella, I., & Penuelas, J. (1994). The red edge position and shape as indicator of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing* (15 (7)), S. 1459-1470.
- Fischer, C. (2002). Use of GIS and Multitemporal Imaging Spectrometer data for Modelling and Mapping Environmental Changes in Mining Areas. *Proceedings of the ISPRS*

Commission IV Symposium "Geospatial Theory, Processing and Applications", 34 (4), S. 460-464. Ottawa.

- Fischer, C., Fischer, C., Brunn, A., Dittmann, C., Vosen, P., & Busch, W. (2003). Detection of plant reflectance anomalies in mining areas using imaging spectroscopy. *3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*. Hersching.
- FMVO. (2000). *Futtermittelerordnung i. d. Neufassung vom 23.11.2000*. BGBl II 93/2000.
- Friese, K., Witter, B., Miehl, G., & Rode, M. (2000). *Stoffhaushalt von Auenökosystemen - Böden und Hydrologie, Schadstoffe, Bewertungen*. Berlin: Springer-Verlag.
- Fuchs, H. J. (2003). *Methodische Ansätze zur Erfassung von Waldbäumen mittels digitaler Luftbildauswertung*. Dissertation, Göttingen.
- Gamon, J. A., & Surfus, J. S. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist* (143), S. 105-117.
- Gamon, J. A., Penuelas, J., & Field, C. B. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in Photosynthetic Efficiency. *Remote Sensing of Environment* (41), S. 35-44.
- Gao, B.-C. (1996). NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* (58), S. 257-266.
- Gao, B.-C., Heidebrecht, K. B., & Goetz, A. H. (1993). Derivation of scaled surface reflectance from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment* (44), S. 165-178.
- Garty, J., Tamir, O., Hassid, I., Eshel, A., Cohen, Y., Karnieli, A., et al. (2001). Photosynthesis, chlorophyll integrity and spectral reflectance in lichens exposed to air pollution. *Journal of Environmental Quality* (30), S. 884-893.
- Geller, W., Ockenfeld, K., Böhme, M., & Knöchel, A. (2004). *Schadstoffbelastung nach dem Elbe-Hochwasser 2002*. Endbericht des Ad-hoc-Verbundprojekts UFZ Leipzig-Halle GmbH, Magdeburg.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., & Chivkunova, O. B. (2001). Optical Properties and Nondestructive Estimation of Anthocyanin Content in Plant Leaves. *Photochemistry and Photobiology* (74 (1)), S. 38-45.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., & Lichtenthaler, H. (1996). Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm. *Journal of Plant Physiology* (148), S. 501-508.
- Guyot, G., & Baret, F. (1988). Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'état des couverts vegetaux. *Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures in Remote Sensing*, (S. 279-286). Aussois.
- Hardinsky, M. A., Lemas, V., & Smart, R. M. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of spartina alternifolia canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (49), S. 77-83.
- Hartung, J., Elpelt, B., & Klösener, K. H. (2009). *Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik* (15. Ausg.). München: Oldenbourg.
- Heldt, H. W. (2003). *Pflanzenbiochemie* (3. Ausg.). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Henrich, V., Jung, A., Götze, C., Thürkow, D., & Gläßer, C. (2009). Development of an online indices database: Motivation, concept and implementation. *Proceeding of 6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop Innovative Tool for Scientific and Commercial Environment Applications*. Tel Aviv.
- Hermes, U., & Brümmer, G. (1984). Einflußgrößen der Schwermetalllöslichkeit und -bindung in Böden. *Zeitschrift Pflanzenernährung Bodenkunde* (147), S. 400-424.

- Hese, S. M. (2001). *Entwicklung und Anwendung geostatistischer Verfahren zur strukturellen Klassifizierung von Forstbeständen in hochauflösenden Daten der HRSC-A*. Dissertation, Berlin.
- Hildebrandt, G. (1996). *Fernerkundung und Luftbildmessung: für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie*. Heidelberg: Wichmann Verlag.
- Hock, B., & Elstner, E. F. (1995). *Schadwirkungen auf Pflanzen. Lehrbuch der Pflanzentoxikologie* (3. Ausg.). Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag.
- Hogg, R. V., & Tanis, E. A. (2006). *Probability and statistical inference* (8. Ausg.). Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Holzwarth, F., Radtke, H., Hilger, B., & Bachmann, G. (2000). Bundes-Bodenschutzgesetz, Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, Handkommentar. In *Bodenschutz & Altlasten* (2. Ausg., Bd. 5, S. 448). Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Horler, D. H., Dockray, M., & Barber, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing* (4 (2)), S. 273-288.
- Huang, Z., Turner, B. J., Dury, S. J., Wallis, I. R., & Foley, W. J. (2004). Estimating foliage nitrogen concentration from HYMAP data using continuum removal analysis. *Remote Sensing of Environment* (93), S. 18-29.
- Humbeck, K., Quast, S., & Krupinska, K. (1996). Functional and molecular changes in the photosynthetic apparatus during senescence of flag leaves from field-grown barley plants. *Plant, Cell and Environment* (19), S. 337-344.
- Hunt, J. E., & Rock, B. N. (1989). Detection of Changes in Leaf Water Content using Near- and Middle-Infrared Reflectances. *Remote Sensing of Environment* (30), S. 43-54.
- Hyde Hecker, J. (2003). *Investigation of the relationship between chlorophyll concentration and high spectral resolution data of Phragmites australis in heavy metal contaminated sites*. MSc Thesis, Enschede.
- Jago, R. A., Cutler, M. J., & Curran, P. J. (1999). Estimating Canopy Chlorophyll Concentration from Field and Airborne Spectra. *Remote Sensing of Environment* (68), S. 217-224.
- Jähne, B. (2002). *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin: Springer Verlag.
- Johnson, L. F., & Billow, C. R. (1996). Spectrometric estimation of total nitrogen concentration in Douglas-fir foliage. *International Journal of Remote Sensing* (17), S. 489-500.
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* (50), S. 663-666.
- Jung, A., Götze, C., & Gläßer, C. (2008). Estimation and phenological monitoring of urban pioneer vegetation based on hyperspectral remote sensing. *Proceedings EARSeL Joint Workshop "Remote Sensing - New Challenges of High Resolution"*, (S. 129-140). Bochum.
- KA5. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung* (5. Ausg.). (B. f. Rohstoffe, & N. L. Bodenforschung, Hrsg.) Hannover.
- Kabata-Pendias, A. (2001). *Trace elements in soils and plants* (3. Ausg.). Boca Raton: CRC Press.
- Kammermeyer, F., & Zerpies, R. (2000). *Mathe*. Berlin: Cornelsen Scriptor.
- Kancheva, R., & Borisova, D. (2005). Spectral models for crop state assessment considering soil and anthropogenic impacts. *31st International Symposium on Remote Sensing of Environment 2005*. St. Petersburg.

- Kancheva, R., Borisova, D., & Georgiev, G. (2003). Informational potential of vegetation spectral reflectance in anthropogenic impact studies. In *Annual of University of Mining and Geology* (Bd. 46 (1), S. 355-359). Sofia.
- Kokaly, R. F., & Clark, R. N. (1999). Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment* (67), S. 267-287.
- Kooistra, L. (2004). *Incorporating spatial variability in ecological risk assessment of contaminated river floodplains*. PhD Thesis, Nijmegen.
- Kooistra, L., Leuven, R. E., Wehrens, R., Nienhuis, P. H., & Buydens, L. C. (2003). A comparison of methods to relate grass reflectance to soil metal contamination. *International Journal of Remote Sensing* (24 (24)), S. 4995-5010.
- Kooistra, L., Salas, E. L., Clevers, J. G., Wehrens, R., Leuven, R. S., Nienhuis, P. H., et al. (2004). Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains. *Environmental Pollution* (127 (2)), S. 281-290.
- Kostrzewski, M., Waller, P., Guertin, P., Haberland, J., Colaizzi, P., Barnes, E., et al. (2003). Ground-based remote sensing of water and nitrogen stress. *Transactions of the ASAE* (46 (1)), S. 29-38.
- Kumar, L., Schmidt, K. S., Dury, S., & Skidmore, A. K. (2001). Imaging spectrometry and vegetation science. In F. D. van der Meer, & S. M. de Jong, *Imaging spectrometry: Basic principles and prospective applications*. Dordrecht: Springer.
- Kundzewicz, Z., Graczyk, D., Maurer, T., Pinskiwar, I., Radziejewski, M., Svensson, C., et al. (2005). Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow. *Hydrological Sciences Journal* (50 (5)), S. 797-810.
- Küpper, H., Küpper, F., & Spiller, M. (1998). In situ detection of heavy metal substituted chlorophylls in water plants. *Photosynthesis Research* (58), S. 123-133.
- Küpper, H., Setlik, I., Spiller, M., Küpper, F. C., & Prásil, O. (2002). Heavy metal-induced inhibition of photosynthesis: targets of in vivo heavy metal chlorophyll formation. *Journal of Phycology* (38 (3)), S. 429-441.
- LAGB, L. f. (2006). *Bodenbericht 2006. Böden und Bodeninformationen in Sachsen-Anhalt*. Halle: Mitteilungen zu Geologie und Bergwesen in Sachsen - Anhalt, Band 11.
- Lamb, D. W., Steyn-Ross, M., Schaare, P., Hanna, M. M., Silvester, W., & Steyn-Ross, A. (2002). Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium* spp.) pasture using the chlorophyll red-edge: theoretical modelling and experimental observations. *International Journal of Remote Sensing* (23 (18)), S. 3619-3648.
- Larcher, W. (2001). *Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt* (6 Ausg.). Stuttgart: UTB Ulmer Eugen Verlag.
- LAU, L. f. (2008). *Umweltfachdaten zum Thema Naturschutz, Immissionsschutz, Klimaschutz, Boden, Wasser sowie medienübergreifenden Umweltschutz in Sachsen-Anhalt*. <http://www.mu.sachsen-anhalt.de/start/main.htm>.
- Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, H., & Kaspar, F. (2006). Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Climatic Change* (75), S. 273-299.
- Levitt, J. (1972). *Responses of Plants to Environmental Stress*. New York: Academic Press.
- Li, F., Gnyp, M. L., Jia, L., Miao, Y., Yu, Z., Koppe, W., et al. (2008). Estimating N status of winter wheat using a handheld spectrometer in the North China Plain. *Field Crops Research* (106), S. 77-85.

- Liao, J. P., Lin, X. G., Cao, Z. H., Shi, Y. Q., & Wong, M. H. (2003). Interactions between arbuscular mycorrhizae and heavy metals under sand culture experiment. *Chemosphere* (50 (6)), S. 847-853.
- Libbert, E. (1993). *Lehrbuch der Pflanzenphysiologie* (5. Ausg.). Jena: G. Fischer.
- Liedtke, H., & Marcinek, J. (2002). *Physische Geographie Deutschlands* (3. Ausg.). Gotha: Klett-Perthes.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2008). *Remote Sensing and Image Interpretation* (6th Ausg.). New York: Wiley & Sons.
- Lilliefors, H. W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association* (62), S. 399-402.
- Liu, L., Wang, J., Huang, W., Zhao, C., Zhang, B., & Tong, Q. (2004). Estimating winter wheat plant water content using red edge. *International Journal of Remote Sensing* (25 (17)), S. 3331-3342.
- Lobell, D. B., & Asner, G. P. (2003). Hyperion studies of crop stress in Mexico. *Proceedings of the 12th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*. Pasadena.
- Lübben, S., & Sauerbeck, D. (1991). Transferfaktoren und Transferkoeffizienten für den Schwermetallübergang Boden-Pflanze. In D. Sauerbeck, & S. Lübben, *Auswirkungen von Siedlungsabfällen auf Böden, Bodenorganismen und Pflanzen* (Bd. 6, S. 180-223). Berichte aus der Ökologischen Forschung.
- Lucas, N. S., Curran, P. J., Plummer, S. E., & Danson, F. M. (2000). Estimating the stem carbon production of a coniferous forest using an ecosystem simulation model driven by the remotely sensed red edge. *International Journal of Remote Sensing* (21 (4)), S. 619-631.
- Markwell, J., Osterman, J. C., & Mitchell, J. L. (1995). Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research* (46), S. 467-472.
- Martin, M. E., & Aber, J. D. (1997). High spectral resolution remote sensing of forest canopy lignin, nitrogen, and ecosystem processes. *Ecological Application* (7), S. 431-443.
- Matson, P., Johnson, L. F., & Billow, C. (1994). Seasonal patterns and remote spectral estimation of canopy chemistry across the Oregon transect. *Ecological Applications* (4), S. 280-298.
- Merton, R. (1998). Monitoring community hysteresis using spectral shift analysis and the red-edge vegetation stress index. *Proceedings of the Seventh Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*. Pasadena.
- Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., & Rakitin, V. Y. (1999). Non-Destructive Optical Detection of Leaf Senescence and Fruit Ripening. *Physiologia Plantarum* (106), S. 135-141.
- Metzner, H., Rau, H., & Senger, H. (1965). Untersuchungen zur Synchronisierbarkeit einzelner Pigmentmutanten von Chlorella. *Planta* (65), S. 186-194.
- Miller, J. R., Hare, E. W., & Wu, J. (1990). Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance. *International Journal of Remote Sensing* (11 (10)), S. 1755-1773.
- Milly, P., Wetherald, R., Dunne, K., & Delworth, T. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature* (415), S. 514-517.
- Mobasheri, M. R., Rezaei, Y., & Valadan Zoej, M. J. (2007). A Method in Extracting Vegetation Quality Parameters Using Hyperion Images, with Application to Precision Farming. *World Applied Sciences Journal* (2 (5)), S. 476-483.
- Montero, S., Irene, C., & George, H. (2001). Semi-Automated Fast Mineral Identification Algorithm for Ultraviolet, Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy.

- Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology.*
Cancun.
- Munden, R., Curran, P. J., & Catt, J. A. (1994). The relationship between red edge and chlorophyll concentration in the broadbalk winter wheat experiment at Rothamsted. *International Journal of Remote Sensing* (15 (3)), S. 705-709.
- Mutanga, O. (2004). *Hyperspectral remote sensing of tropical grass quality and quantity.* Dissertation, Wageningen.
- Noomen, M. F., van der Meer, F. D., & Skidmore, A. K. (2005). Hyperspectral remote sensing for detecting the effects of three hydrocarbon gases on maize reflectance. *Proceedings of the 31st international symposium on remote sensing of environment : global monitoring for sustainability and security.* Saint Petersburg.
- Otte, M. L., & Wijte, A. B. (1993). Environmental variation between habitats and uptake of heavy metals by *Urtica dioica*. *Environmental Monitoring and Assessment* (28 (2)), S. 263-275.
- Overesch, M. (2002). *Schwermetalle in Auenökosystemen. Bindungsformen in Böden und Gehalte in Pflanzen.* Diplomarbeit, Münster.
- Overesch, M., Rinklebe, J., Broll, G., & Neue, H.-U. (2007). Metals and arsenic in soils and corresponding vegetation at Central Elbe river floodplains (Germany). *Environmental Pollution* (145), S. 800-812.
- Penuelas, J., Filella, I., & Baret, F. (1995). Semiempirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica* (31), S. 221-230.
- Penuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., & Savé, R. (1993). The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing* (14 (10)), S. 1887-1905.
- Penuelas, J., Gamon, J. A., Fredeen, A. L., Merino, J., & Field, C. B. (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment* (48), S. 135-146.
- Penuelas, J., Gamon, J. A., Griffin, K. L., & Field, C. B. (1993). Assessing Community Type, Plant Biomass, Pigment Composition, and Photosynthetic Efficiency of Aquatic Vegetation from Spectral Reflectance. *Remote Sensing of Environment* (46), S. 110-118.
- Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., & Filella, I. (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/ R970). *International Journal of Remote Sensing* (18 (13)), S. 2869-2875.
- Peterson, J., & Langner, U. (1992). *Katalog der Biotoptypen und Nutzungstypen für die CIR-luftbildgestützte Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung im Land Sachsen-Anhalt.* Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt.
- Petterson, O. (1976). Heavy-metal ion uptake by plants from nutrient solution with metal ion, plant species and growth period variations. *Plant and Soil* (45), S. 445-459.
- Pinar, A., & Curran, P. J. (1996). Grass chlorophyll and the reflectance red edge. *International Journal of Remote Sensing* (17 (2)), S. 351-357.
- Prange, A., Furrer, R., Einax, J. W., Lochovsky, P., Kofalk, S., & Reincke, H. (2000). *Die Elbe und ihre Nebenflüsse. Belastung, Trends, Bewertung, Perspektiven.* ATV-DVWK Forschungsberichte.
- Prasad, M. (2004). *Heavy metal stress in plants: from biomolecules to ecosystems* (2. Ausg.). Heidelberg: Springer Verlag.

- Pu, R., Ge, S., Kelly, N. M., & Gong, P. (2003). Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. *International Journal of Remote Sensing* (24 (9)), S. 1799-1810.
- Ray, S. S., Singh, J. P., Das, G., & Panigrahy, S. (2004). Use of high resolution remote sensing data for generating site-specific soil management plan. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (35 (B7)).
- Ren, H. Y., Zhuang, D. F., Pan, J. J., Shi, X. Z., & Wang, H. J. (2008). Hyper-spectral remote sensing to monitor vegetation stress. *Journal of Soils and Sediments* (8), S. 323-326.
- Reusen, I., Bertels, L., Debruyne, W., Deronde, B., Franssaer, D., & Sterckx, S. (2003). Species Identification and Stress Detection of Heavy-Metal Contaminated Trees. *Proceedings of the US EPA 'Spectral Remote Sensing of Vegetation' conference*. Las Vegas.
- Riedell, W. E., & Blackmer, T. M. (1999). Leaf reflectance spectra of cereal aphid-damaged wheat. *Crop Science* (39), S. 1835-1840.
- Rinklebe, J. (2004). *Differenzierung von Auenböden der Mittleren Elbe und Quantifizierung des Einflusses von deren Bodenkennwerten auf die mikrobielle Biomasse und die Bodenenzymaktivitäten von β -Glucosidase, Protease und alkalischer Phosphatase*. Dissertation, Halle (Saale).
- Rinklebe, J., Düring, A., Overesch, M., Du Laing, G., Wennrich, R., Stärk, H.-J., et al. (2010). Dynamics of mercury fluxes and their controlling factors in large Hg-polluted floodplain areas. *Environmental Pollution* (158), S. 308-318.
- Rinklebe, J., Franke, C., Heinrich, K., Helbach, C., Meyenburg, G., & Neue, H. U. (2001). *Übertragung und Weiterentwicklung eines robusten Indikationssystems für ökologische Veränderungen in Auen*. Projektbericht RIVA, Teilbericht II.2: Boden, UFZ, Leipzig, Halle.
- Rinklebe, J., Heinrich, K., Morgenstern, P., Franke, C., & Neue, H. U. (1999). Die Verteilung von Schwermetallen in Bodenprofilen von Auenböden im Biosphärenreservat Mittlere Elbe. *Leipziger Geowissenschaften* (11), 129-138.
- Rinklebe, J., Marahrens, S., Böhnke, R., Amarell, U., & Neue, H. U. (2000). Großmaßstäbige bodenkundliche Kartierung im Biosphärenreservat Mittlere Elbe. In K. Friese, B. Witter, G. Miehlisch, & M. Rode, *Stoffhaushalt von Auenökosystemen*. Berlin: Springer-Verlag.
- Rinklebe, J., Overesch, M., Stubbe, A., & Neue, H. U. (2006). *Gefahrenabschätzung für Grundwasser und Nutzpflanzen bei erhöhten Gehalten von Cadmium, Zink, Kupfer, Chrom, Nickel, Blei, Quecksilber und Arsen in Auenböden der Elbe*. Abschlussbericht.
- Rock, B. N., Hoshizaki, T., & Miller, J. R. (1988). Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. *Remote Sensing of Environment* (24), S. 109-127.
- Rosso, P. H., Pushnik, J. C., Lay, M., & Ustin, S. L. (2005). Reflectance properties and physiological responses of *Salicornia virginica* to heavy metal and petroleum contamination. *Environmental Pollution* (137), S. 241-252.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-*, (S. 301-317). Greenbelt.
- Royo, C., Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Monneveux, P., & Araus, J. L. (2003). Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting Mediterranean conditions. *International Journal of Remote Sensing* (24 (22)), S. 4403-4419.

- Sauerbeck, D. (1989). Der Transfer von Schwermetallen in die Pflanze. In D. Behrens, & J. Wiesner, *Beurteilung von Schwermetallkontaminationen im Boden* (S. 281-316). Frankfurt: Dechema.
- Sauerbeck, D. (1982). Welche Schwermetallgehalte in Pflanzen dürfen nicht überschritten werden, um Wachstumsbeeinträchtigungen zu vermeiden. *Landwirtschaftliche Forschung* (Sonderheft 39), S. 108-129.
- Savitzky, A., & Golay, M. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry* (36 (8)), S. 1627-1638.
- Schaepman, M. E., Wamelink, G. W., van Dobben, H. F., Gloor, M., Schaepman-Strub, G., Kooistra, L., et al. (2007). River Floodplain Vegetation Scenario Development Using Imaging Spectroscopy Derived Products as Input Variables in a Dynamic Vegetation Model. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (73 (10)), S. 1179-1188.
- Scheffer, F., & Schachtschabel, P. (2002). *Lehrbuch der Bodenkunde* (15. Ausg.). Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Schellekens, J. H., Gilbes, F., Rivera, G. D., Ysa, Y. C., Chardón, S., & Fong, Y. (2005). Reflectance spectra of tropical vegetation as a response to metal enrichment in the substrate of West-central Puerto Rico. *Transactions of the 16th Caribbean Geological Conference*. 39, S. 9-12. Barbados: Caribbean Journal of Earth Sciences.
- Schlemmer, M. R., Francis, D. D., Shanahan, J. F., & Schepers, J. S. (2005). Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. *Agronomy Journal* (97), S. 106-112.
- Scholz, M., Stab, S., & Henle, K. (2001). *Indikation in Auen – Präsentation der Ergebnisse aus dem RIVA-Projekt*. UFZ-Bericht Nr. 8, Leipzig, Halle (Saale).
- Schützendübel, A., & Polle, A. (2002). Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. *Journal of Experimental Botany* (53 (372)), S. 1351-1365.
- Serrano, L., Penuelas, J., & Ustin, S. L. (2002). Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data: Decomposing biochemical from structural signals. *Remote Sensing of Environment* (81), S. 355-364.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality. *Biometrika* (52 (3)).
- Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* (81), S. 337-354.
- Singhroy, V., & Kruse, F. (1991). Detection of metal stress in Boreal Forest Species using the 0.67 µm chlorophyll absorption band. *Proceedings of the eight Thematic conference on geologic remote sensing, exploration, engineering and environment*, (S. 361-372). Denver.
- Singhroy, V., Stanton-Gray, R., & Springer, J. (1986). Spectral geobotanical investigation of mineralized till sites. *Proceedings of the Fifth Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology*. Reno.
- Smidt, S. (2004). *Waldschädigende Luftverunreinigungen: Eigenschaften - Nachweis - Monitoring - Waldschadensforschung - Immissionsschutz*. Wien: Schriftenreihe des Bundesamtes und Forschungszentrums für Wald.
- Stanford, M. G., Coops, N. C., Dudzinski, M., Old, K., Culvenor, D. C., & Stone, C. (2001). *Testing generic capabilities of a condition indicator for forest health and vitality*. Project no.: PN99.814a, Forest & Wood Products Research & Development Corporation.

- Suarez Barranco, L. (2006). *Estimation of The Spatial Frequency Distribution of Biomass in River Floodplains; A case study using field and airborne Imaging Spectrometer data in the Millingerwaard*. Thesis Report, Wageningen.
- Suarez, L., Kooistra, L., & Schaepman, M. (2007). Use of imaging spectroscopy to map vegetation hydraulic resistance in river floodplains. *Proceedings of the 5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*. Brügge.
- Swain, P. H., & Davis, S. M. (1978). *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. New York: McGraw-Hill.
- Swaton, T. (2001). *Böden, Schwermetallbelastung und Gefährdungspotential im NSG Biberwerder (Biosphärenreservat Mittlere Elbe)*. Diplomarbeit, Halle (Saale).
- Tahiro, E. (2002). *Untersuchungen von Sommerweizengenotypen unterschiedlicher Herkunft auf Hitze- und Trockenstresstoleranz*. Dissertation, Halle (Saale).
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2000). *Physiologie der Pflanzen*. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- TrinkWV. (2001). *Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21.05.2001*. BGBl I S.959-980.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Reading: Addison-Wesley.
- Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K., & Pleijel, H. (2007). Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis Research* (91), S. 37-46.
- Underwood, E., Ustin, S., & DiPietro, D. (2003). Mapping nonnative plants using hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment* (86), S. 150-161.
- Vogler, K. (1993). *Schwermetallaufnahme der Vegetation in Abhängigkeit von sorptionsrelevanten Bodeneigenschaften*. Dissertation, Zürich.
- Voß, K. (2005). *Beitrag zur skalenabhängigen Erfassung teilschlagspezifischer Pflanzenschäden mit Methoden der Fernerkundung und Geoinformation*. Dissertation, Bonn.
- Wang, F. M., Huang, J. F., Tang, Y. L., & Wang, X. Z. (2007). New Vegetation Index and Its Application in Estimating Leaf Area Index of Rice. *Rice Science* (14 (3)), S. 195-203.
- Wilson, E. H., & Sader, S. A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment* (80), S. 385-396.
- Wilson, M. D., Ustin, S. L., & Rocke, D. M. (2004). Classification of contamination in salt marsh plants using hyperspectral reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (42), S. 1088-1095.
- Winkelmann, K. H. (2005). *On the applicability of imaging spectrometry for the detection and investigation of contaminated sites with particular consideration given to the detection of fuel hydrocarbon contaminants in soil*. Dissertation, Cottbus.
- Yang, X. H., Huang, J. F., Wang, F. M., Wang, X. Z., Yi, Q. X., & Wang, Y. (2006). A modified chlorophyll absorption continuum index for chlorophyll estimation. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* (7 (12)), S. 2002-2006.
- Yang, Y. J., Cheng, L. M., & Liu, Z. H. (2007). Rapid effect of cadmium on lignin biosynthesis in soybean roots. *Plant Science* (172), S. 632-639.
- Yoder, B. J., & Pettigrew-Crosby, R. E. (1995). Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400–2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment* (53), S. 199-211.

Anhang

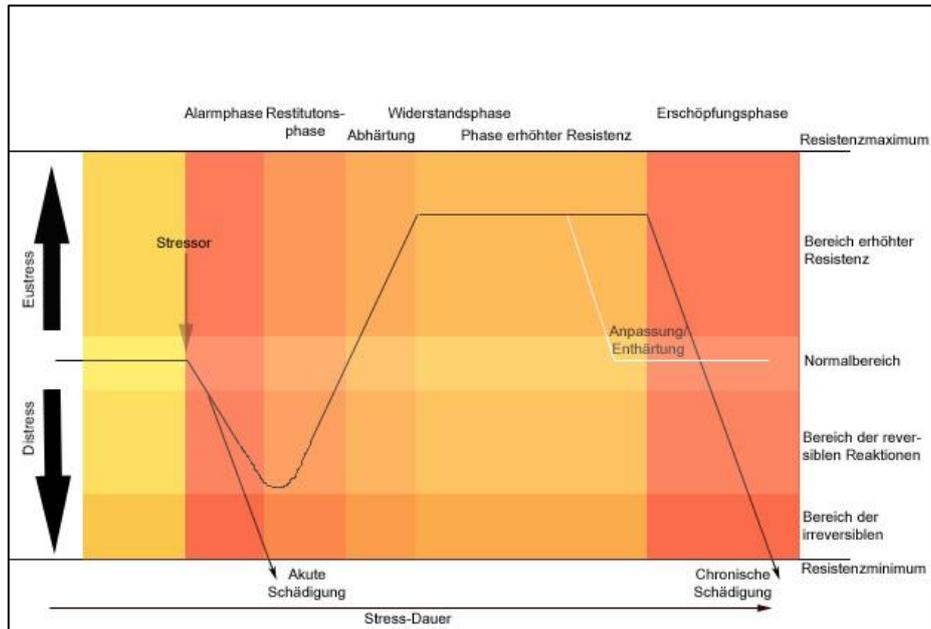


Abbildung Anh. 1: Stressphasen (Brunold, Rüegegger, & Brändle, 1996).

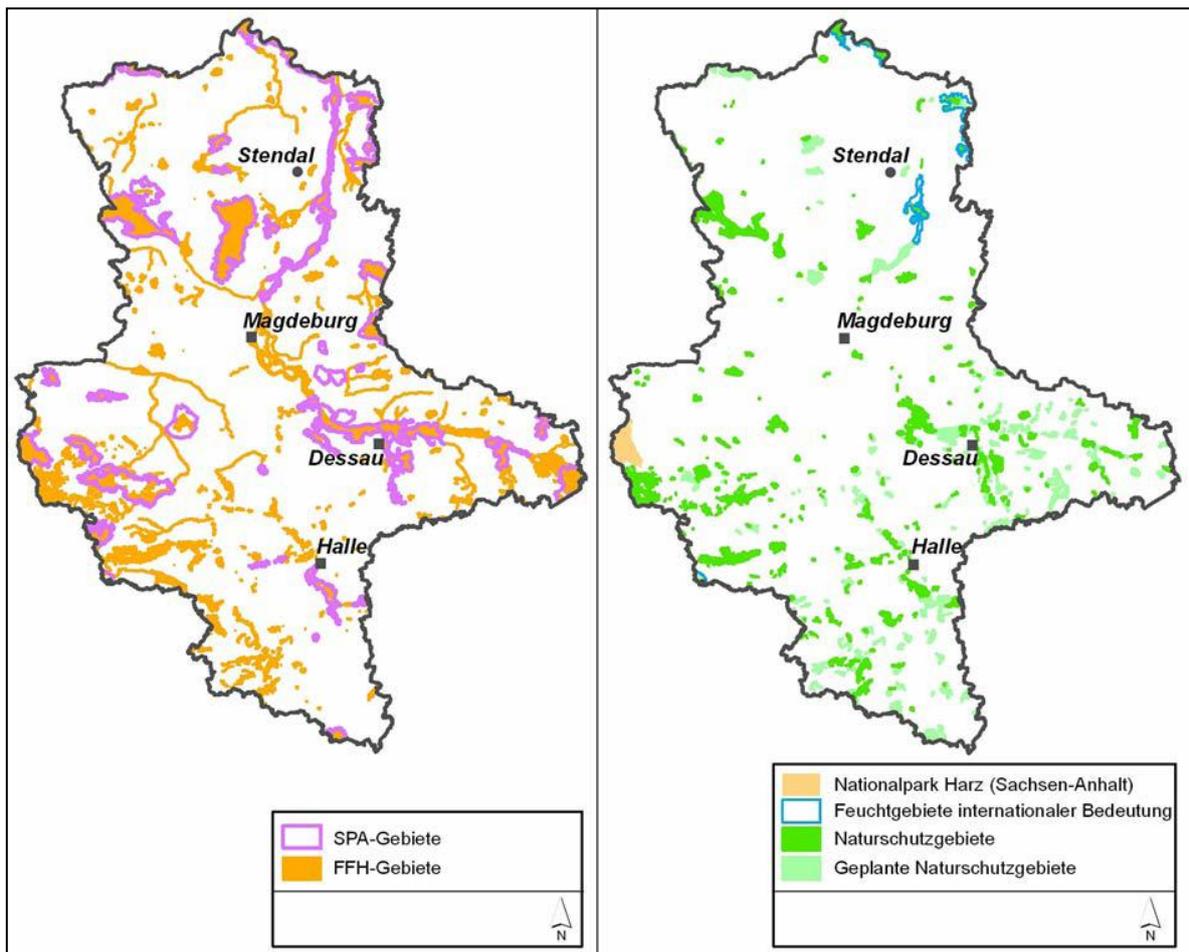


Abbildung Anh. 2: Natura 2000-Gebiete, Nationalpark Harz, FIB und NSG in Sachsen-Anhalt (LAU, 2008).

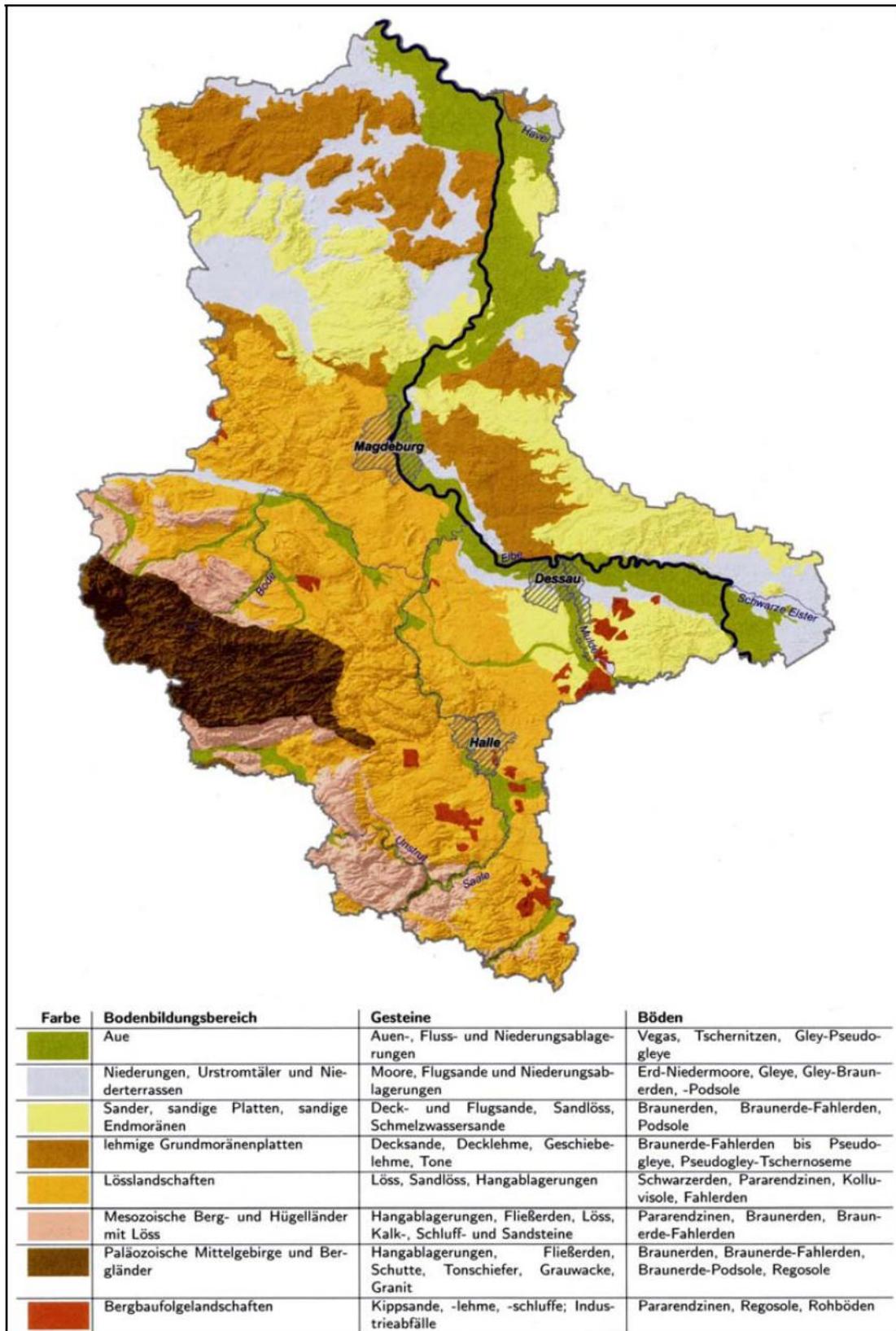


Abbildung Anh. 3: Schema der regionalen Bodenbildungsbereiche (LAGB 2006).

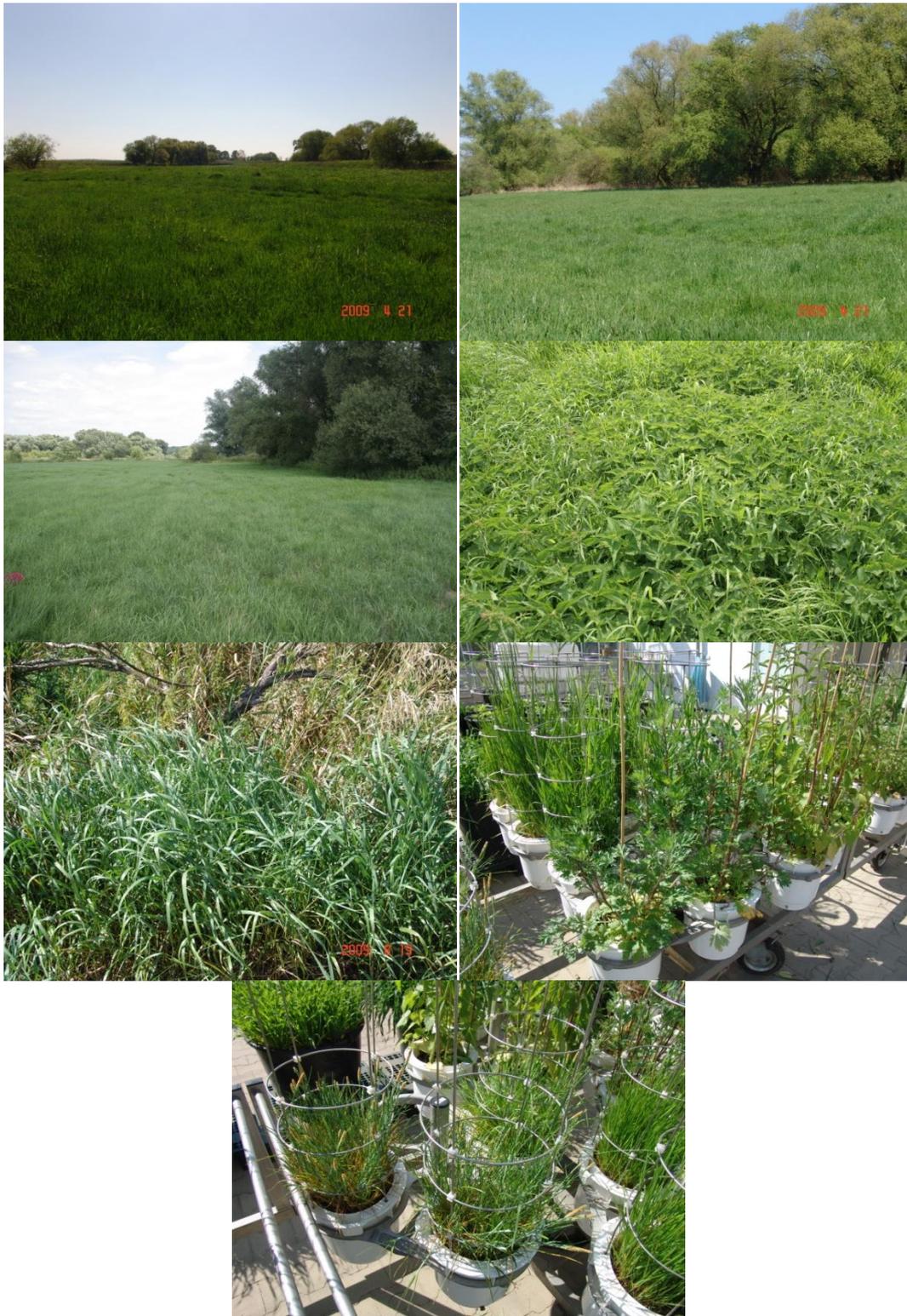


Abbildung Anh. 4: Fotos von Auengebieten an der Mulde unter Grünlandnutzung (1 Reihe),
 Wiesenfuchsschwanzpflanzen (2 Reihe links), Brennesselpflanzen (2 Reihe rechts),
 Rohrglanzgraspflanzen (3 Reihe links), Beifußpflanzen im Gefäßversuch (3 Reihe rechts),
 Knickfuchsschwanz (4 Reihe)

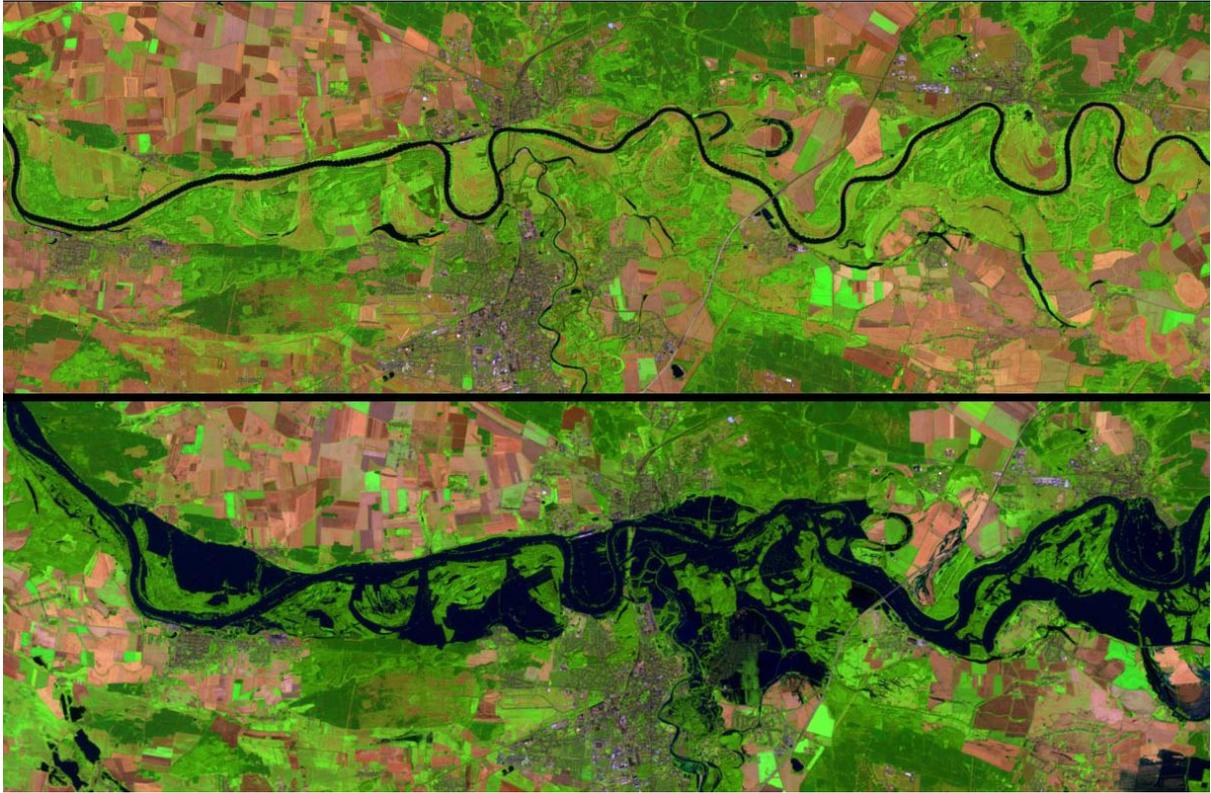


Abbildung Anh. 5: Hochwasser an der Elbe bei Dessau – Aufnahmen vom 14. August 2000 (vorher) und 20. August 2002 (während) mittels Landsat ETM+ (http://visibleearth.nasa.gov/view_detail.php?id=3584).

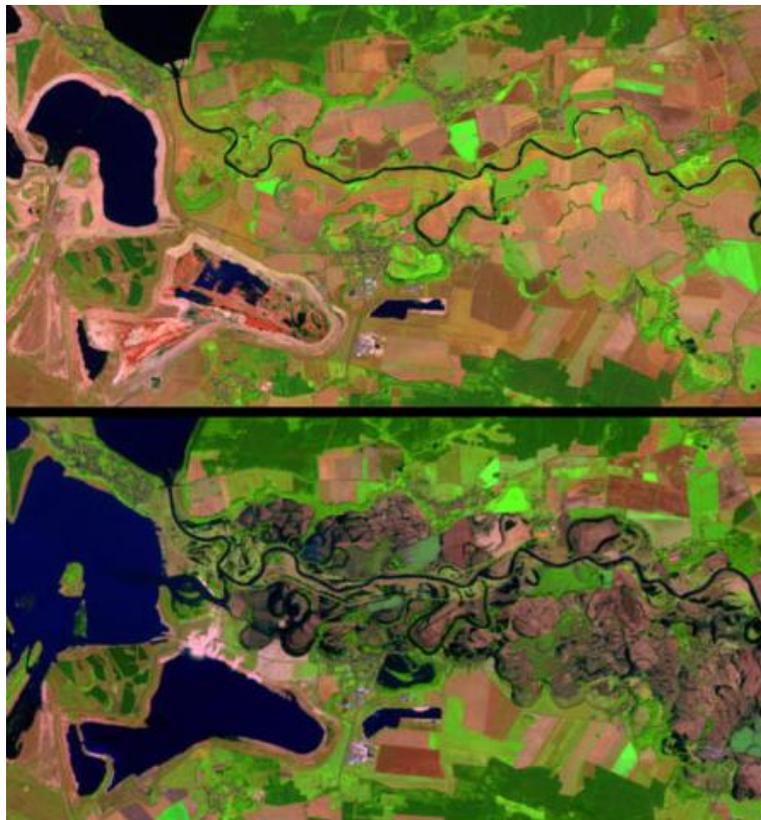


Abbildung Anh. 6: Hochwasser an der Mulde bei Löbnitz Aufnahmen vom 14. August 2000 (vorher) und 20. August 2002 (während) (http://visibleearth.nasa.gov/view_detail.php?id=3584).

Tabelle Anh. 1: Röntgenfluoreszenzanalyseergebnisse vom 28.03.2007 der Bodentypen der Gefäßversuchsreihe von 2007.

Probe	Al ₂ O ₃	As	CaO	Cd	Co	Cr	Cu	Fe ₂ O ₃	Hg	K ₂ O	MgO	Mn	Na ₂ O	Ni	P ₂ O ₅	Pb	S	Zn
	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	%	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Wörlitz P20 (Typ A)	12,10	56	1,450	7	28	188	144	6,23	2	2,080	1,153	1409	0,702	66	7110	152	1830	857
Wörlitz P21 (Typ B)	11,31	36	1,174	<2	25	92	48	4,85	<2	2,016	1,076	924	0,896	36	2000	86	710	221
Wörlitz P22 (Typ C)	15,77	48	1,146	4	27	145	110	5,76	2	2,337	1,489	400	0,607	53	4540	187	1900	369

Tabelle Anh. 2: Röntgenfluoreszenzanalyseergebnisse vom 21.04.2008 der Bodentypen der Gefäßversuchsreihe von 2008.

Probe	Al ₂ O ₃	As	CaO	Cd	Co	Cr	Cu	Fe ₂ O ₃	Hg	K ₂ O	MgO	Mn	Na ₂ O	Ni	P ₂ O ₅	Pb	S	Zn
	%	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	%	%	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
B46111 (Br1)	11,2	113	1,2	12	24	197	185	5,9	4	2,1	1,0	1147	0,66	66	7600	195	1880	996
B46112 (WöNt)	12,4	69	1,4	7	29	186	156	6,3	3	2,1	1,2	1463	0,69	66	6730	173	1450	880
B46113 (WöHf)	10,3	28	1,1	<2	18	77	40	4,2	<2	2,1	1,0	816	0,99	31	1690	60	470	155
B46114 (WöKo)	12,8	55	1,8	4	28	120	98	6,0	<2	2,2	1,3	1447	0,75	49	4160	143	970	485

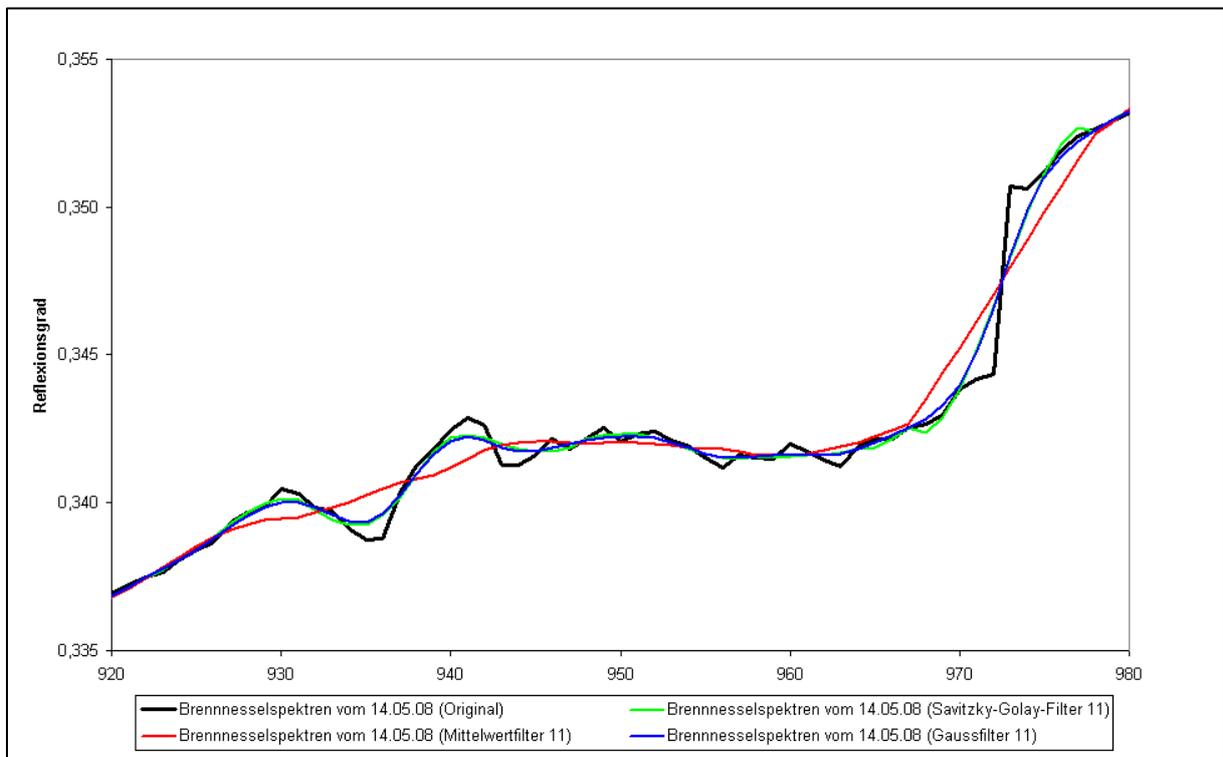


Abbildung Anh. 7: Getestete Filtermethoden im Bereich von 920 bis 980 nm an einem Brennesselspektrum vom 14.05.08.

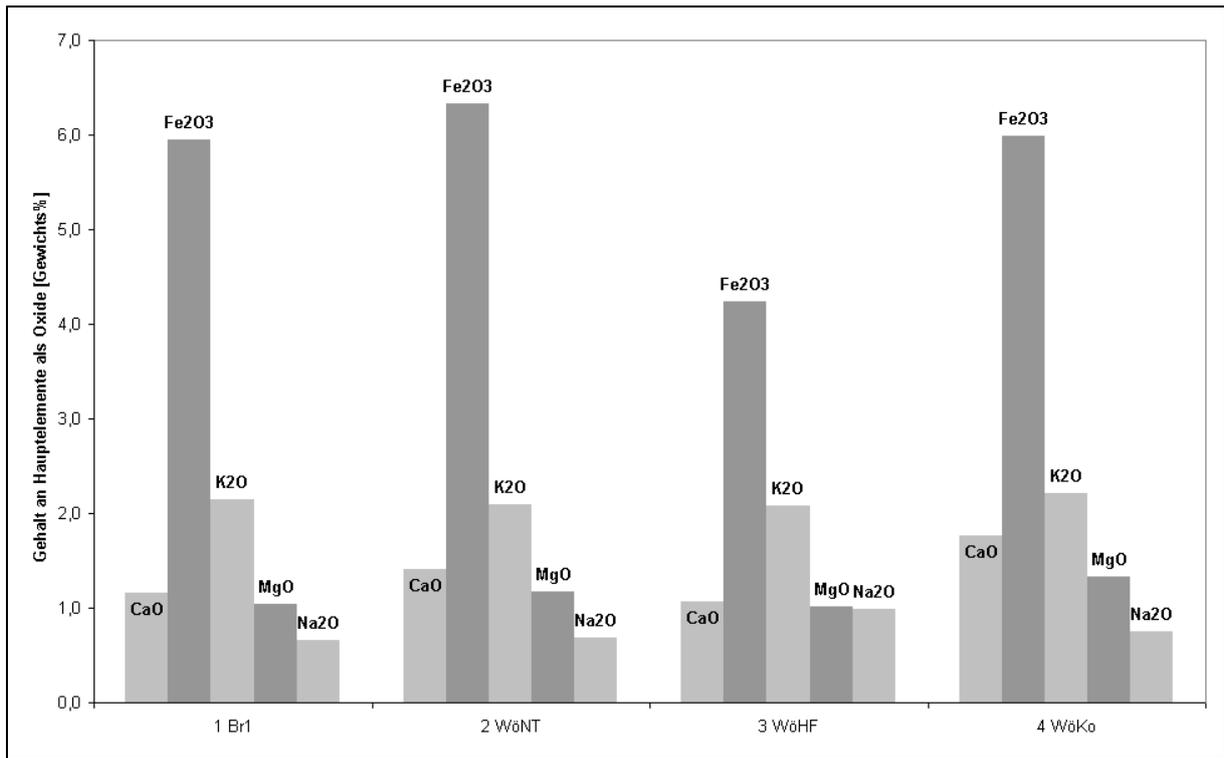


Abbildung Anh. 8: Nährstoffgehalte [mg/kg] der Gefäßversuchsreihe 2008 im Jahr 2008 (Typ BR, WöNT, WöHF und WöKö) - Teil 1

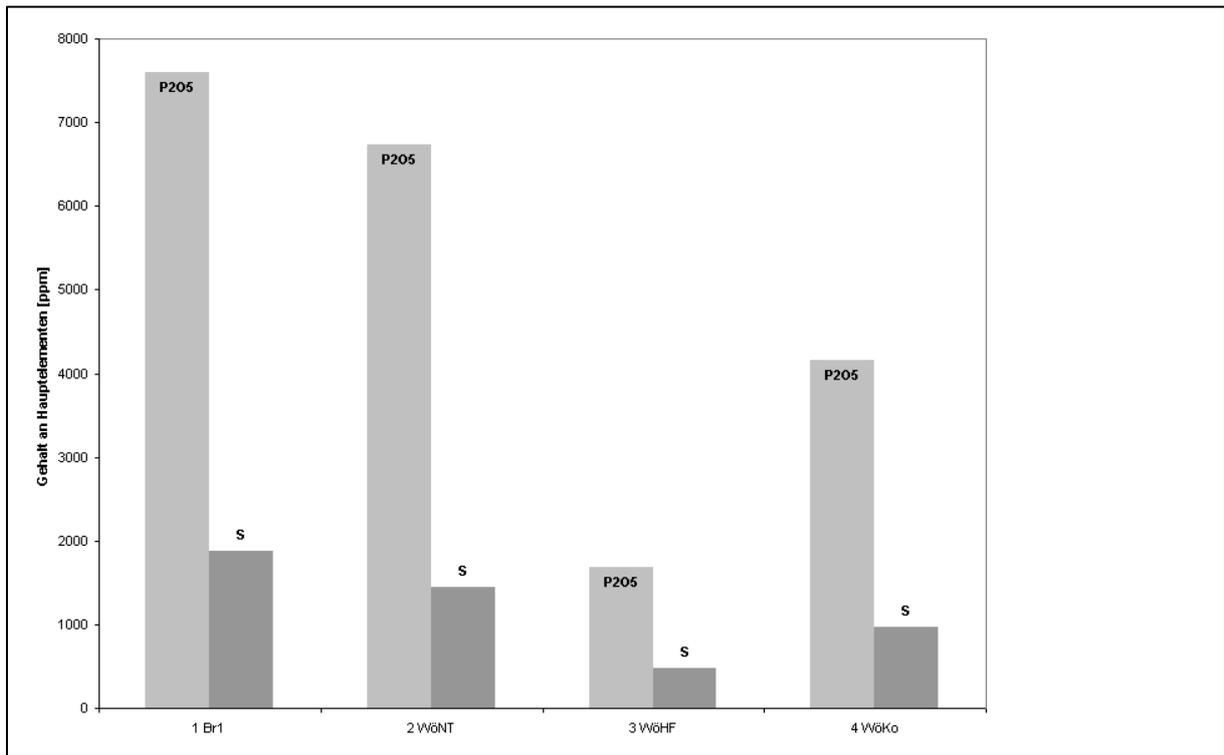


Abbildung Anh. 9: Nährstoffgehalte [mg/kg] der Gefäßversuchsreihe 2008 im Jahr 2008 (Typ BR, WöNT, WöHF und WöKö) - Teil 2.

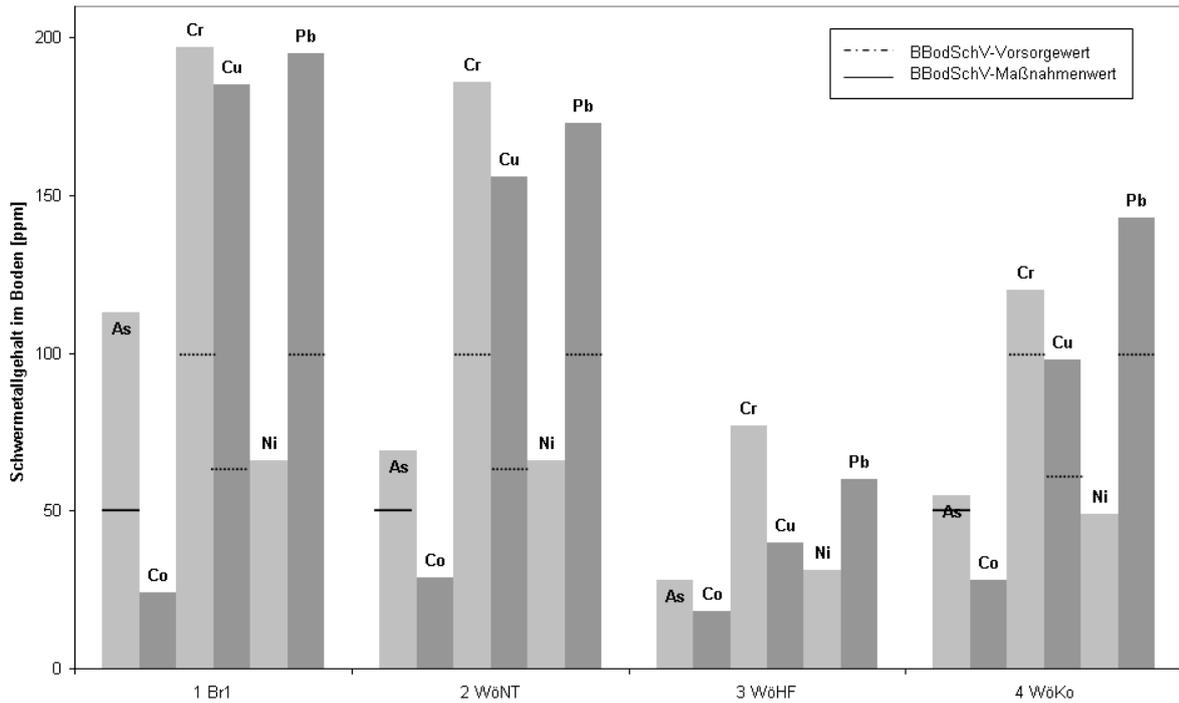


Abbildung Anh. 10: Schwermetallgehalte [mg/kg] der Gefäßversuchsreihe 2008 im Jahr 2008 (Typ BR, WöNT, WöHF und WöKö) sowie deren Grenzwerte der BBodSchV - Teil 1.

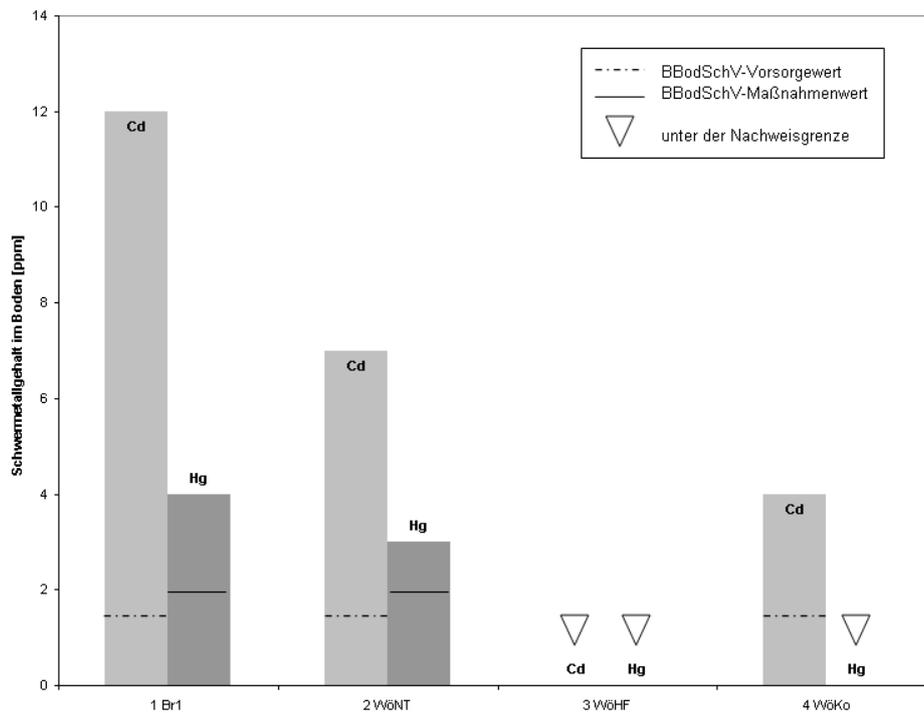


Abbildung Anh. 11: Schwermetallgehalte [mg/kg] der Gefäßversuchsreihe 2008 im Jahr 2008 (Typ BR, WöNT, WöHF und WöKö) sowie deren Grenzwerte der BBodSchV - Teil 2.

Tabelle Anh. 3: Deskriptive Statistik der Gefäßreihe 2007 im Jahr 2007.

Element	N gesamt	Mittelwert	Standard- abweichung	SE des Mittelwerts	Varianz	Summe	Variations- koeffizient	Geometrischer Mittelwert	Minimum	Median	Maximum
As	7	1,83	1,70	0,64	2,88	12,82	0,93	1,44	0,61	1,33	5,60
Cd	11	1,31	1,51	0,45	2,27	14,41	1,15	0,67	0,12	0,69	4,90
Cr	14	0,97	0,70	0,19	0,50	13,53	0,73	0,80	0,32	0,79	3,05
Cu	8	16,08	4,15	1,47	17,20	128,60	0,26	15,61	11,80	15,15	21,00
Ni	14	1,60	1,09	0,29	1,20	22,33	0,69	1,31	0,44	1,18	4,50
P	14	2588,50	637,70	170,43	406667,35	36239,00	0,25	2511,18	1608,00	2705,00	3501,00
Zn	14	73,19	41,76	11,16	1743,60	1024,59	0,57	63,24	26,46	62,80	174,90
SPAD	51	27,50	6,55	0,92	42,88	1402,75	0,24	26,66	13,90	28,80	40,18

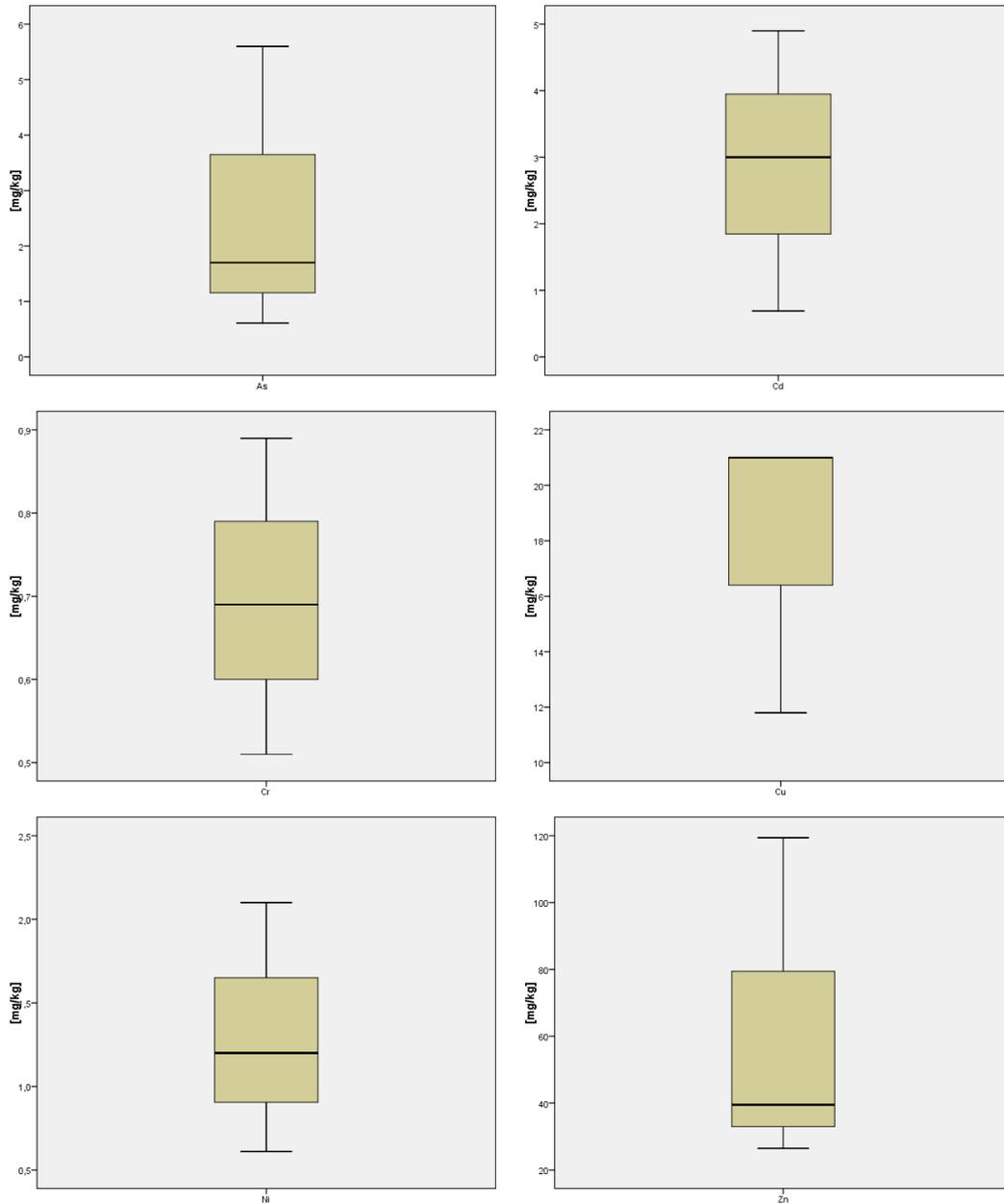


Abbildung Anh. 12: Boxplots der Schwermetallanalysen für As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn des Gefäßversuchs 2007 im Jahr 2007.

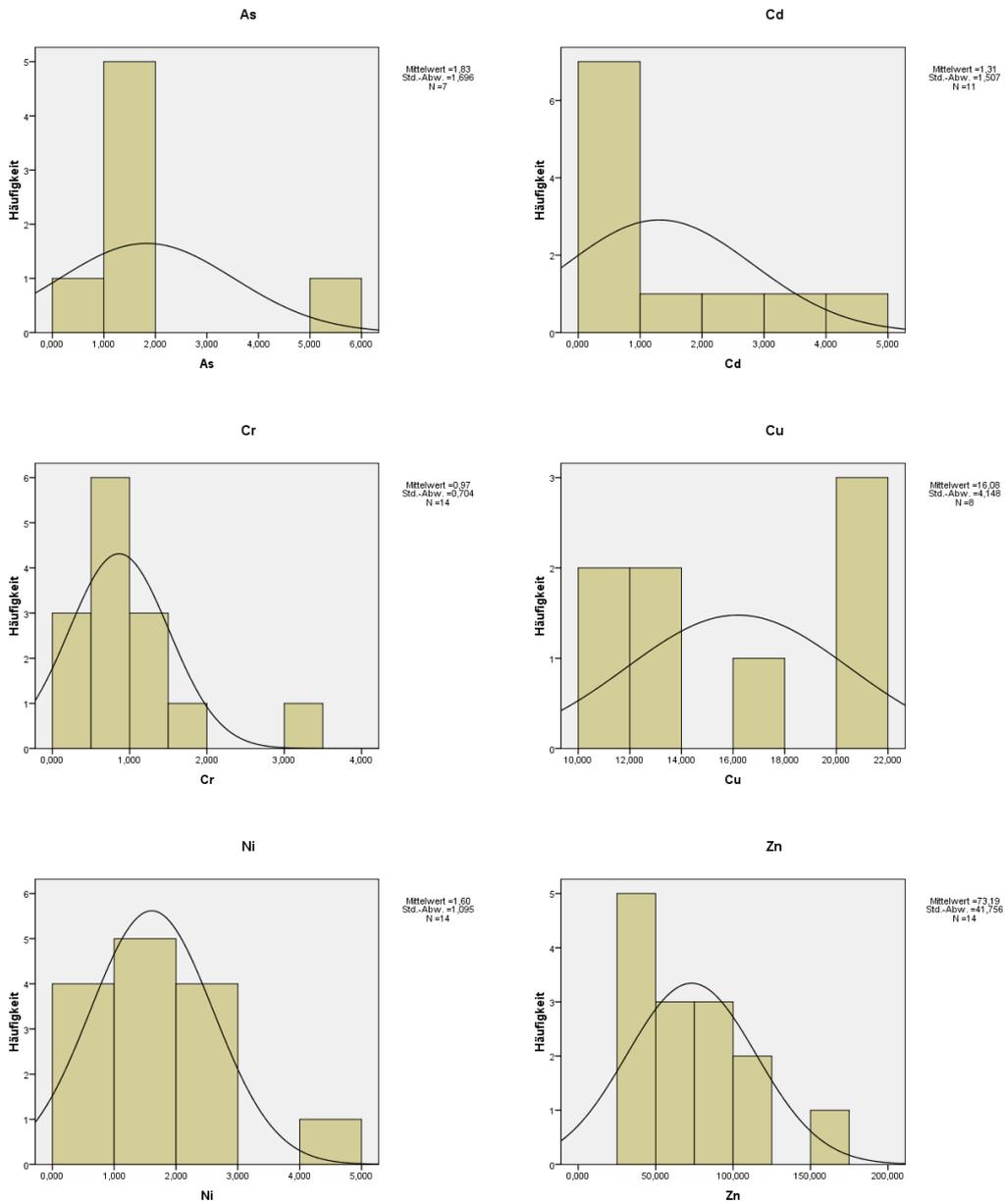


Abbildung Anh. 13: Histogramme mit Normalverteilungskurven der Schwermetallanalysen für As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn des Gefäßversuchs 2007 im Jahr 2007.

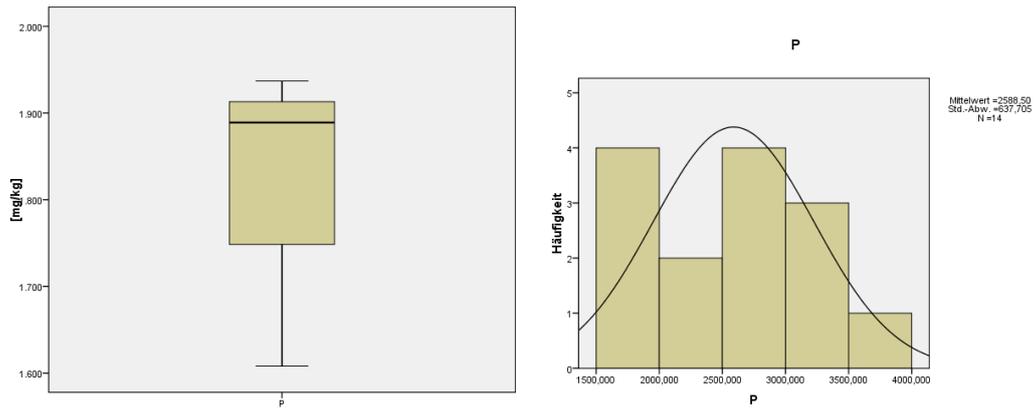


Abbildung Anh. 14: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilungskurve der Nährstoffanalysen für P des Gefäßversuchs 2007 im Jahr 2007.

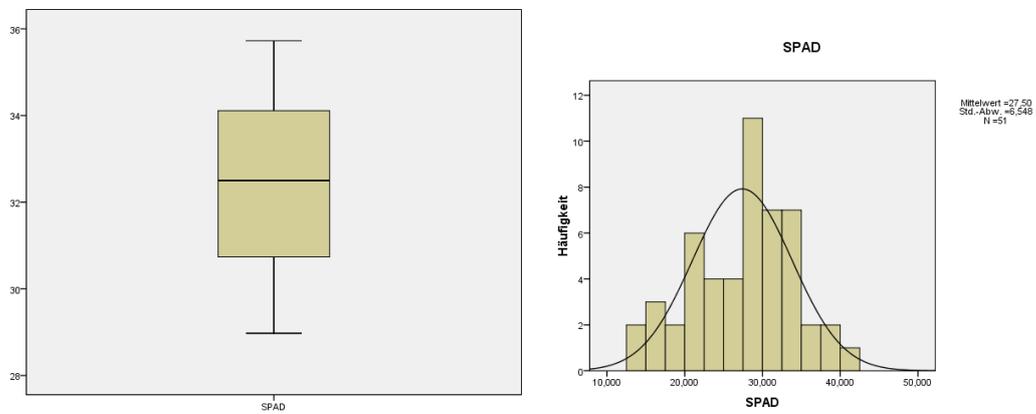


Abbildung Anh. 15: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilungskurve der Chlorophyllmessungen (SPAD) des Gefäßversuchs 2007 im Jahr 2007.

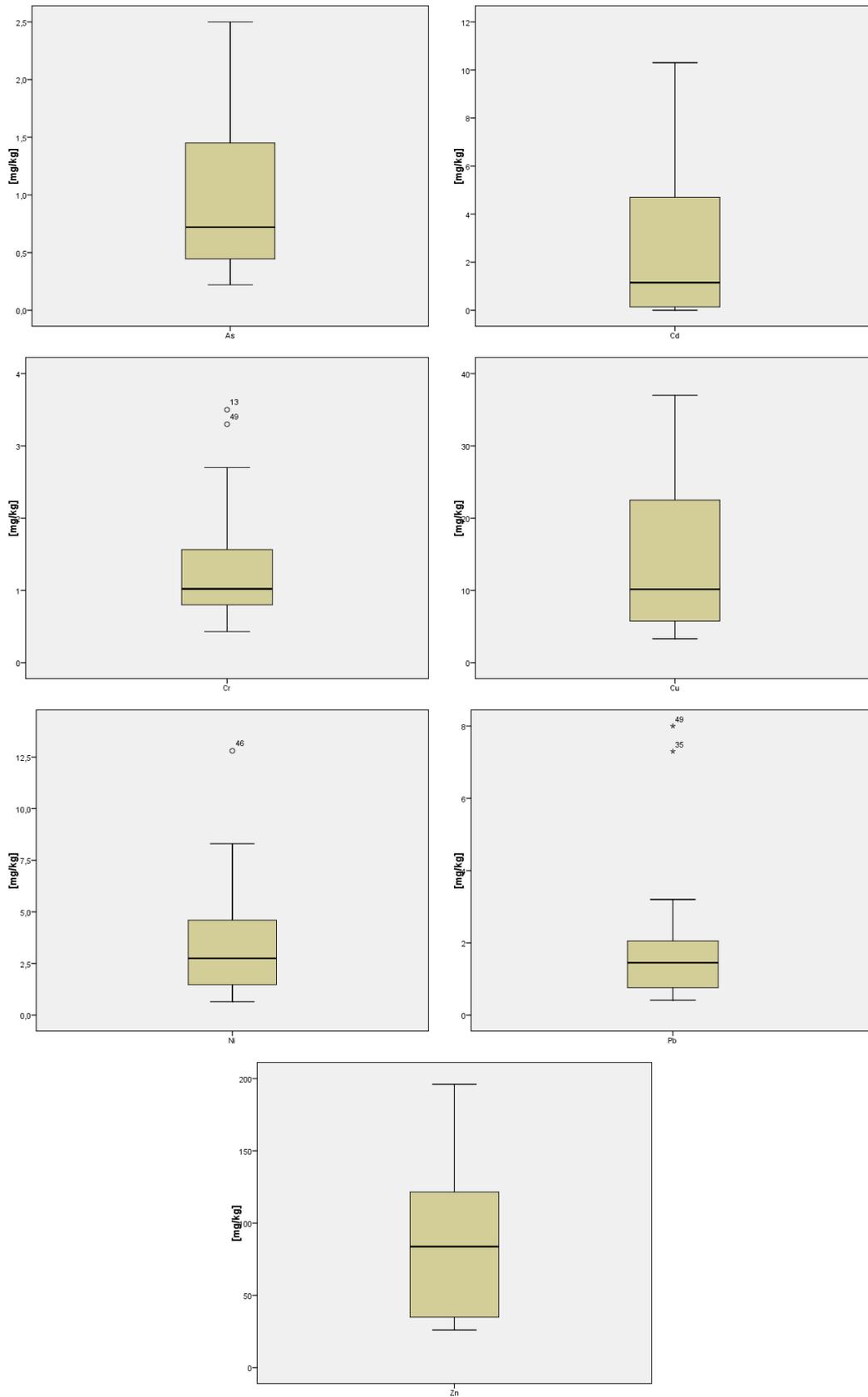


Abbildung Anh. 16: Boxplots der Schwermetallanalysen für As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn des Gefäßversuchs 2007 im Jahr 2008.

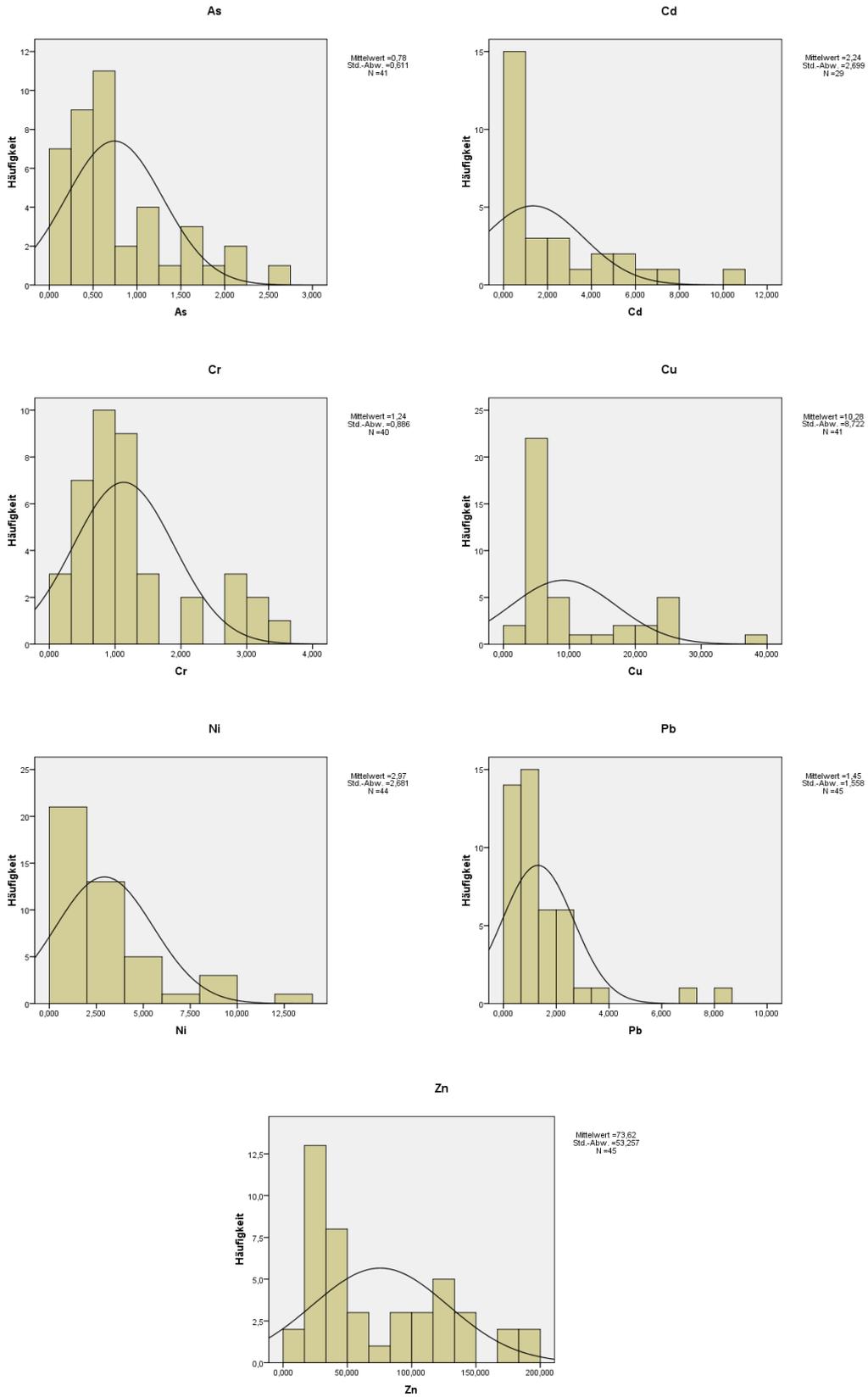


Abbildung Anh. 17: Histogramm mit Normalverteilungskurve der Schwermetallanalysen für As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn des Gefäßversuchs 2007 im Jahr 2008.

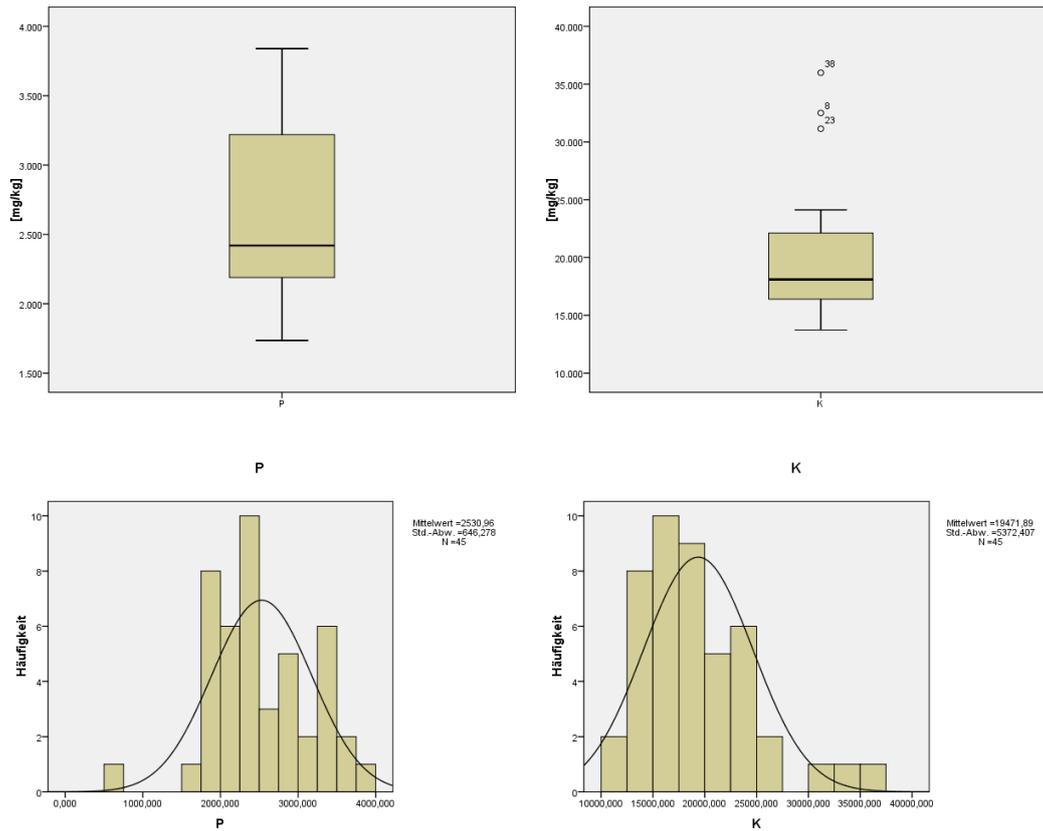


Abbildung Anh. 18: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilungskurve der Nährstoffanalysen für P und K des Gefäßversuchs 2007 im Jahr 2008.

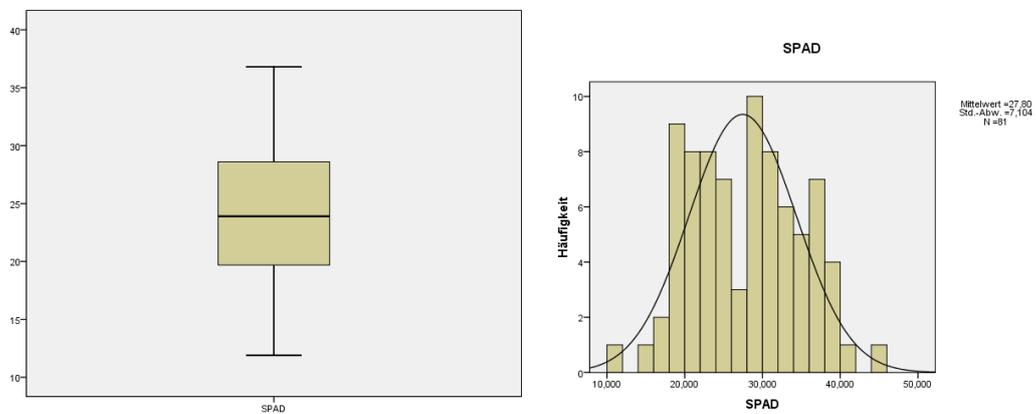


Abbildung Anh. 19: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilungskurve der Chlorophyllmessungen (SPAD) des Gefäßversuchs 2007 im Jahr 2008.

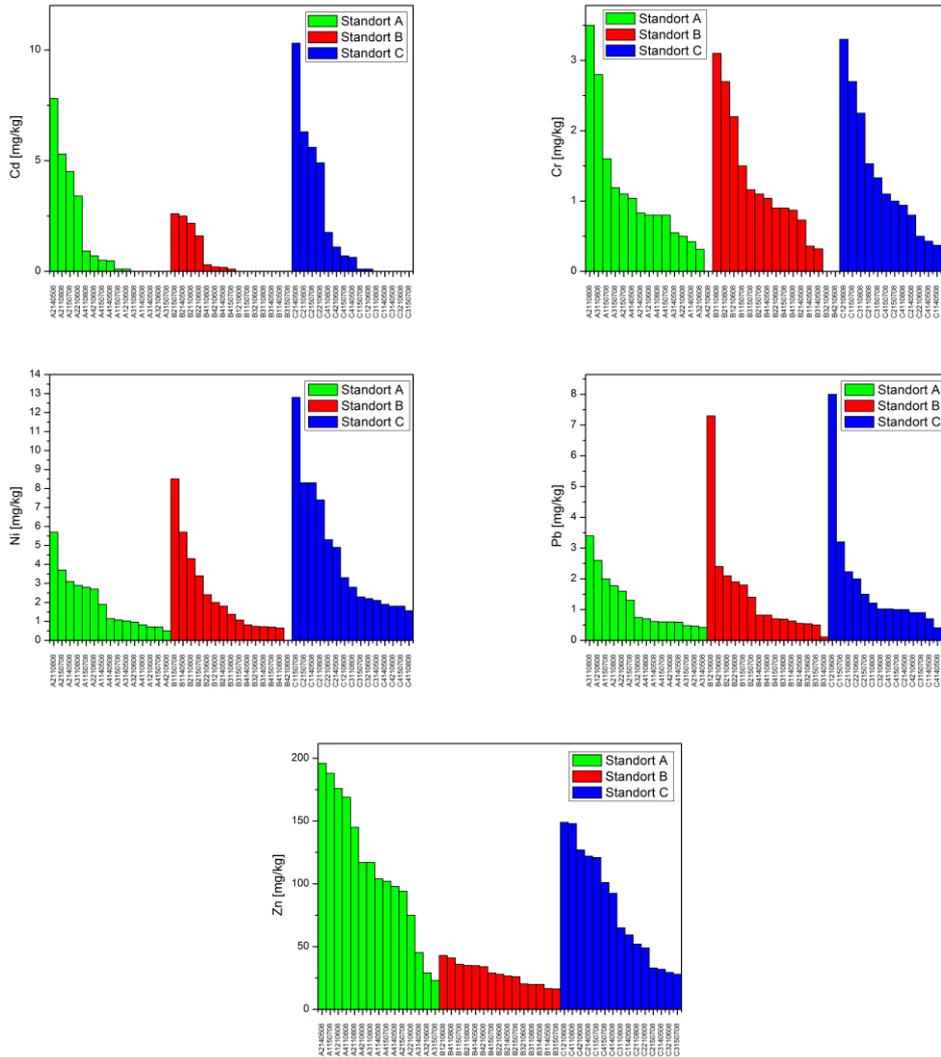


Abbildung Anh. 20: Schwermetallgehaltverteilung [mg/kg] nach Standorten für Cd, Cr, Ni, Pb, Zn der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

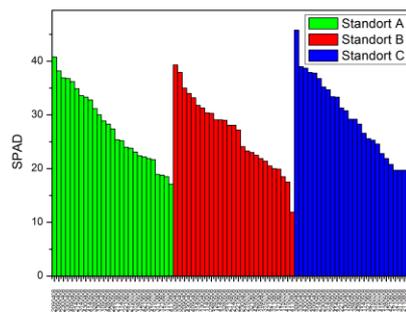


Abbildung Anh. 21: Chlorophyllwertverteilung (SPAD) nach Standorten der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

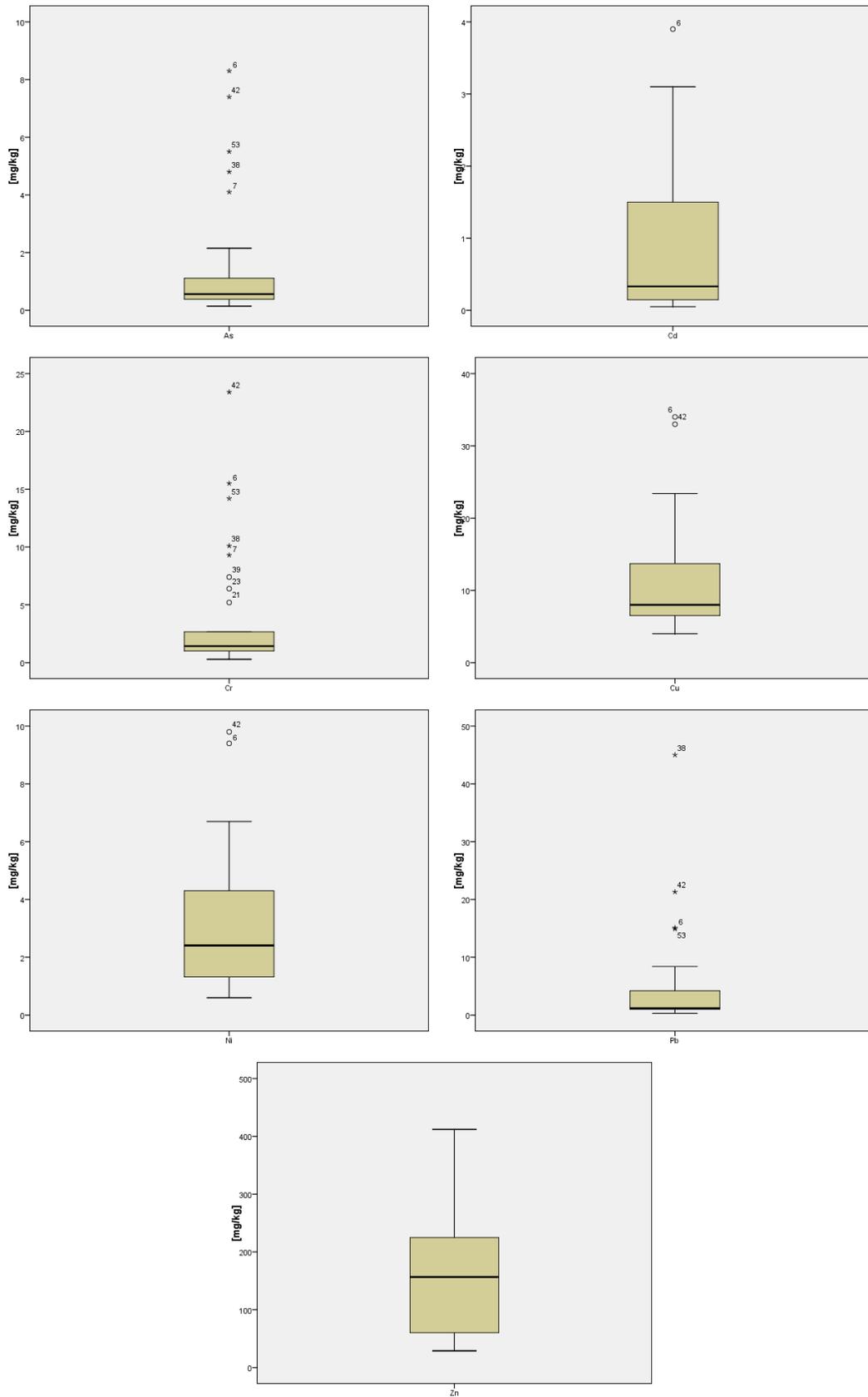


Abbildung Anh. 22: Boxplots der Schwermetallanalysen für As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn des Gefäßversuchs 2008 im Jahr 2008.

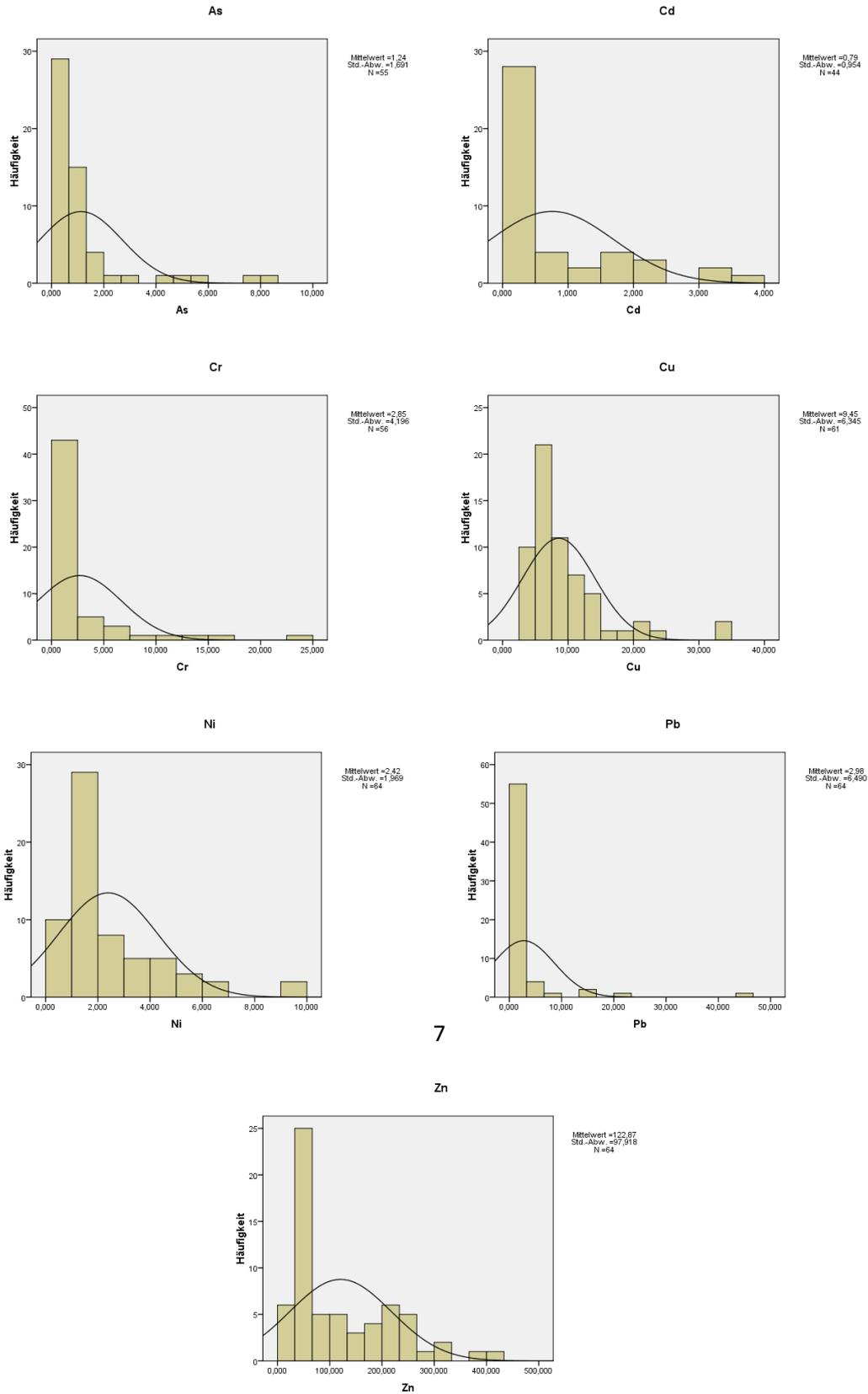


Abbildung Anh. 23: Histogramm mit Normalverteilungskurve der Schwermetallanalysen für As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn des Gefäßversuchs 2008 im Jahr 2008.

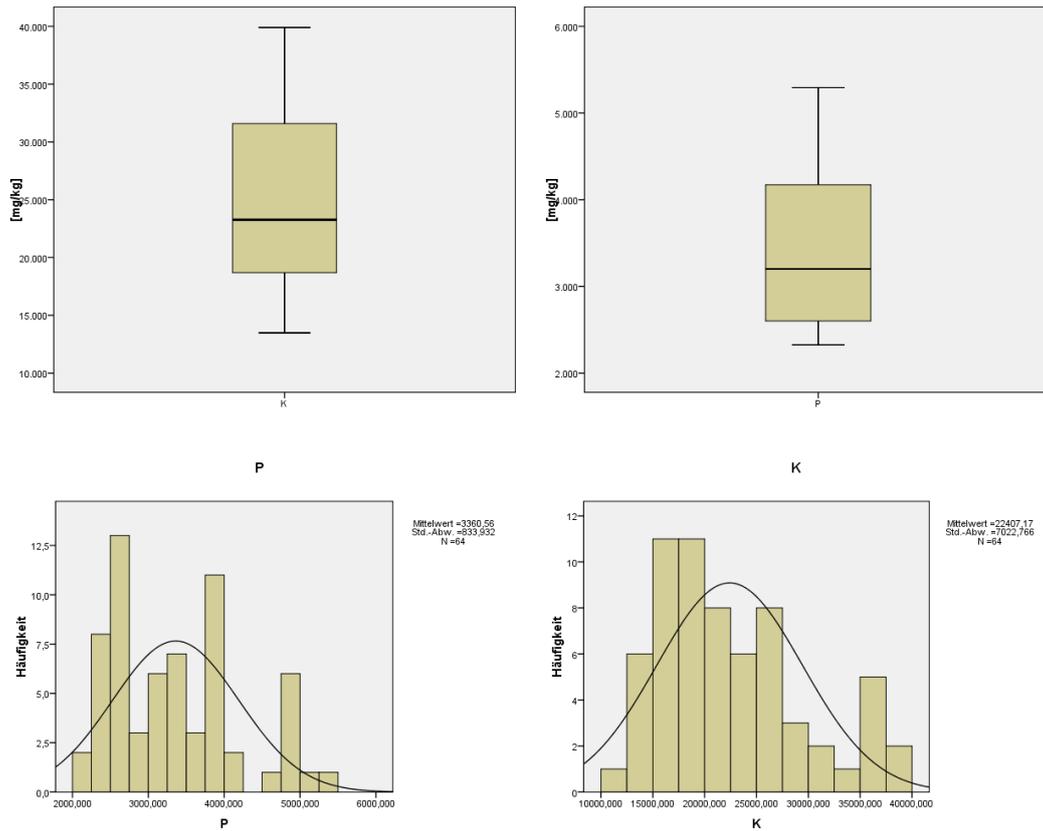


Abbildung Anh. 24: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilungskurve der Nährstoffanalysen für P und K des Gefäßversuchs 2008 im Jahr 2008.

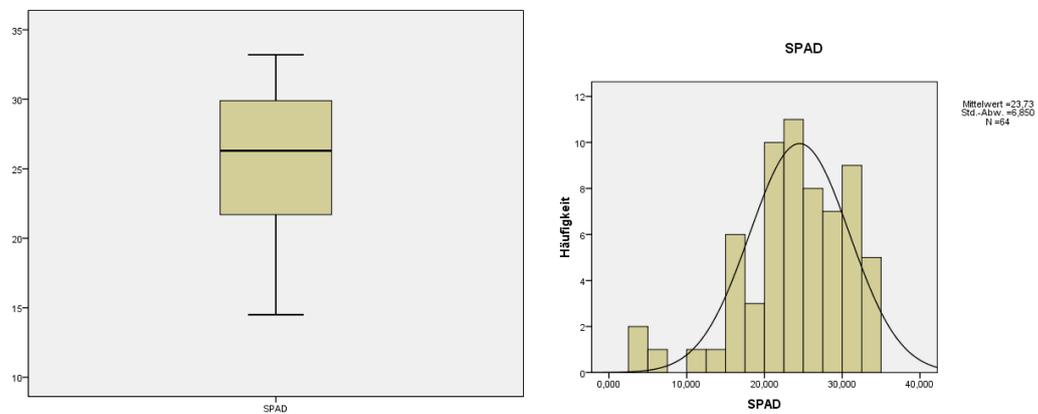


Abbildung Anh. 25: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilungskurve der Chlorophyllmessungen (SPAD) des Gefäßversuchs 2008 im Jahr 2008.

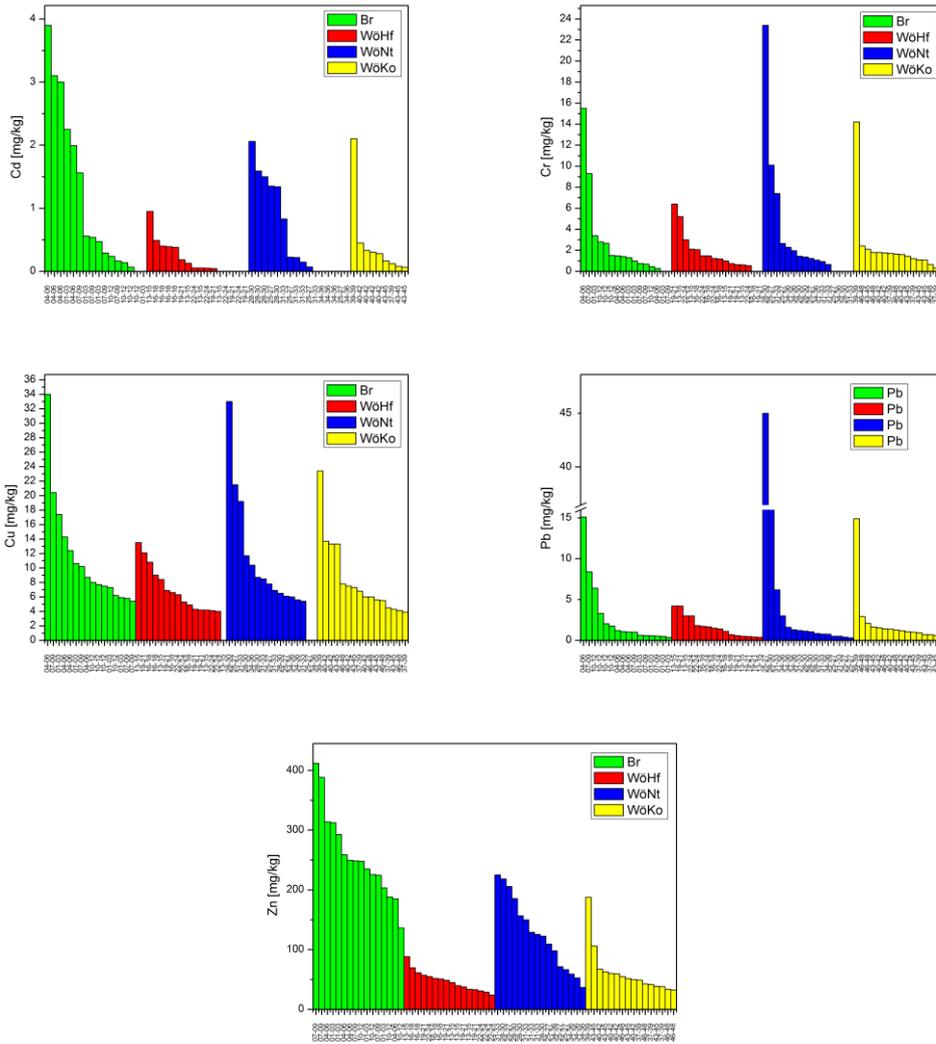


Abbildung Anh. 26: Schwermetallgehaltverteilung [mg/kg] nach Standorten für Cd, Cr, Ni, Pb, Zn der Gefäßversuchsreihe 2008 im Jahr 2008.

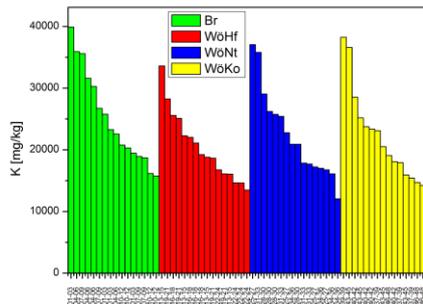


Abbildung Anh. 27: Nährstoffgehaltverteilung für K [mg/kg] nach Standorten der Gefäßversuchsreihe 2008 im Jahr 2008.

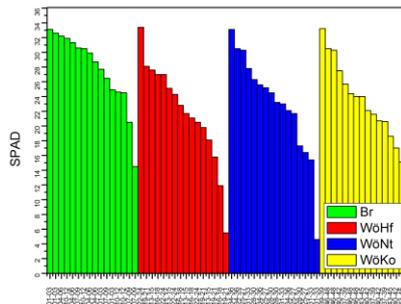


Abbildung Anh. 28: Chlorophyllwertverteilung (SPAD) nach Standorten der Gefäßversuchsreihe 2008 im Jahr 2008.

Tabelle Anh. 4: Normalverteilungstest von den Elementen As, Cd, Cr, Cu, K, Ni, P, Pb, SPAD, Zn für die Gefäßversuchsreihen 2007 im Jahr 2008 (links) und für die Gefäßversuchsreihen 2008 im Jahr 2008 (rechts).

Test	Element	DF	Statistik	p-Wert
Shapiro-Wilk	As	41	0,87717	0,00038
	Cd	29	0,79905	0,00008
	Cr	40	0,83889	0,00005
	Cu	41	0,75813	0,00000
	Ni	44	0,79687	0,00000
	P	45	0,96213	0,14721*
	Pb	45	0,64487	0,00000
	SPAD	81	0,9803	0,24693*
	Zn	45	0,86992	0,00012
	Lilliefors	As	41	0,18447
Cd		29	0,21526	0,00140
Cr		40	0,2234	0,00003
Cu		41	0,27717	0,00000
Ni		44	0,19213	0,00030
P		45	0,11478	0,14748*
Pb		45	0,20968	0,00003
SPAD		81	0,08269	0,18712*
Zn		45	0,19156	0,00026
Kolmogorov-Smirnov		As	41	0,18447
	Cd	29	0,21526	0,11689*
	Cr	40	0,2234	0,03102
	Cu	41	0,27717	0,00282
	Ni	44	0,19213	0,06754*
	P	45	0,11478	0,56729*
	Pb	45	0,20968	0,03256
	SPAD	81	0,08269	0,62597*
	Zn	45	0,19156	0,06398*
	Shapiro-Wilk	As	55	0,59453
Cd		44	0,75931	0,00000
Cr		56	0,55229	0,00000
Cu		61	0,7437	0,00000
K		64	0,91823	0,00042
Ni		64	0,77533	0,00000
P		64	0,93302	0,00182
Pb		64	0,39449	0,00000
Zn		64	0,84391	0,00000
SPAD		64	0,92997	0,00133
Lilliefors	As	55	0,29474	0,00000
	Cd	44	0,27579	0,00000
	Cr	56	0,32618	0,00000
	Cu	61	0,21943	0,00000
	K	64	0,12054	0,02177
	Ni	64	0,20729	0,00000
	P	64	0,13025	0,00882
	Pb	64	0,34233	0,00000
	Zn	64	0,23133	0,00000
	SPAD	64	0,09997	0,11281*
Kolmogorov-Smirnov	As	55	0,29474	0,00010
	Cd	44	0,27579	0,00189
	Cr	56	0,32618	0,00001
	Cu	61	0,21943	0,00464
	K	64	0,12054	0,28745*
	Ni	64	0,20729	0,00687
	P	64	0,13025	0,20882*
	Pb	64	0,34233	0,00000
	Zn	64	0,23133	0,00171
	SPAD	64	0,09997	0,52136*

*Beim Niveau 0,05 wurden die Daten signifikant aus einer normalverteilten Grundgesamtheit gezogen.

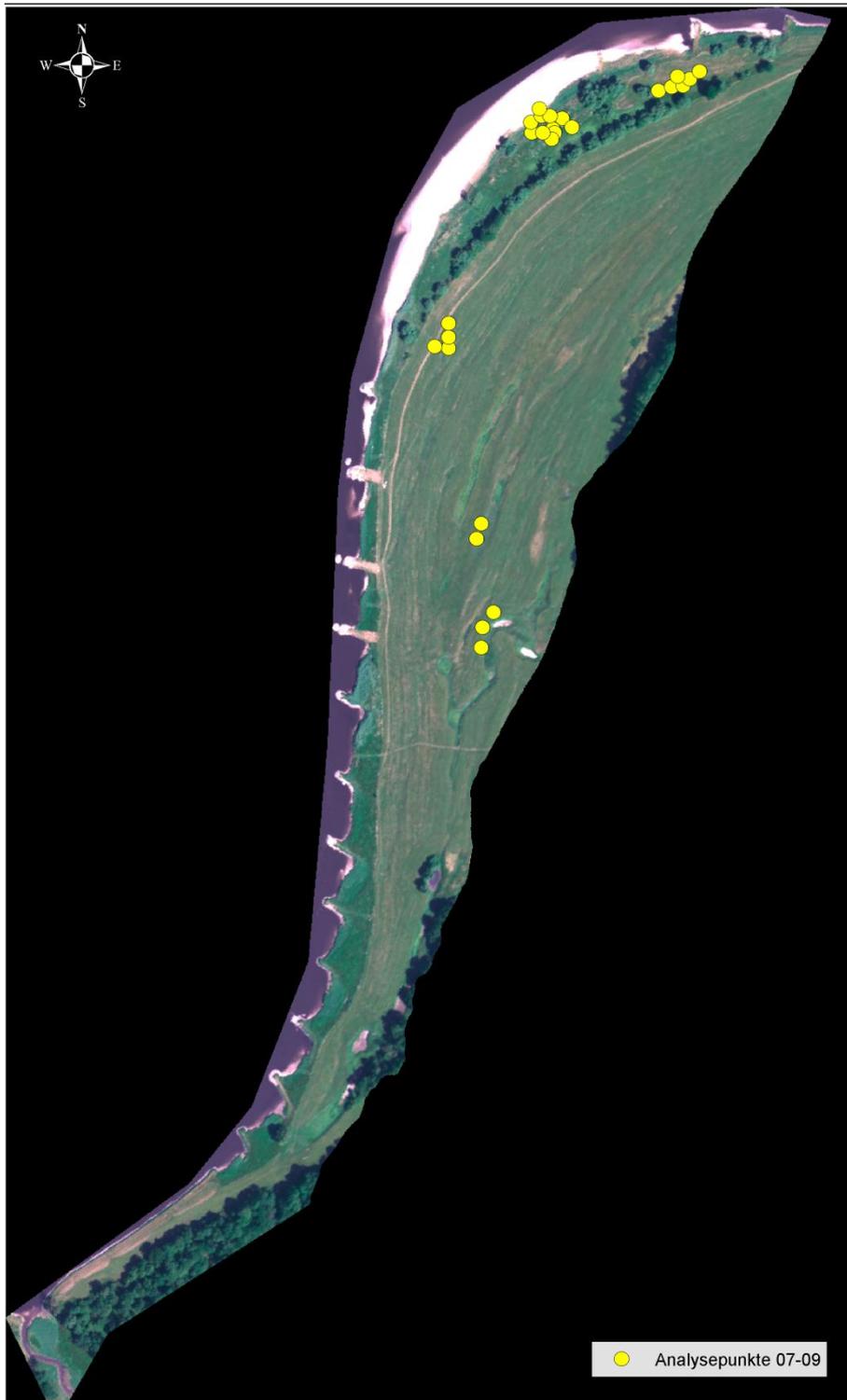


Abbildung Anh. 29: Analysedatenpunkte von 2007 bis 2009 im Untersuchungsgebiet „Schleusenheger Wiesen“ bei Wörlitz (Datengrund Aisa Eagle 2008).

Tabelle Anh. 5: Deskriptive Statistik der HyMap 2008-Kampagne.

Element	Einheit	N gesamt	Mittelwert	Standard- abweichung	SE des Mittelwerts	Varianz	Summe	Variations- koeffizient	Geometrischer Mittelwert	Minimum	Median	Maximum
As	mg/kg	9	0,72	0,27	0,09	0,07	6,45	0,38	0,67	0,39	0,57	1,14
Cd	mg/kg	3	1,55	0,80	0,46	0,64	4,65	0,52	1,36	0,63	1,93	2,09
Cr	mg/kg	15	0,44	0,33	0,09	0,11	6,64	0,76	0,36	0,18	0,29	1,28
Cu	mg/kg	17	10,12	6,00	1,46	36,03	172,10	0,59	8,66	3,60	9,70	26,80
Ni	mg/kg	17	4,24	4,90	1,19	24,03	72,00	1,16	2,49	0,47	2,55	16,60
Pb	mg/kg	17	0,33	0,22	0,05	0,05	5,59	0,68	0,28	0,15	0,24	0,98
K	mg/kg	18	17394,89	4856,87	1144,77	23589100,00	313108,00	0,28	16752,47	11147,00	16628,00	24384,00
P	mg/kg	18	3242,94	1053,97	248,42	1110860,00	58373,00	0,33	3059,88	1275,00	3320,00	5074,00
Zn	mg/kg	18	160,34	208,53	49,15	43485,69	2886,12	1,30	95,28	32,53	82,70	829,00
SPAD (Feld)		19	34,05	4,49	1,03	20,13	646,90	0,13	33,76	25,30	33,90	41,10

Tabelle Anh. 6: Deskriptive Statistik der Analysedaten 2007 und 2008 aus dem Feldversuch.

Element	Einheit	N gesamt	Mittelwert	Standard- abweichung	SE des Mittelwerts	Varianz	Summe	Variations- koeffizient	Geometrischer Mittelwert	Minimum	Median	Maximum
As	mg/kg	9	0,18	0,24	0,08	0,06	1,64	1,34	0,12	0,04	0,08	0,82
Cd	mg/kg	6	0,11	0,06	0,02	0,00	0,63	0,55	0,09	0,05	0,09	0,20
Cr	mg/kg	9	0,61	0,75	0,25	0,56	5,52	1,22	0,40	0,13	0,32	2,50
Cu	mg/kg	10	7,28	1,14	0,36	1,30	72,80	0,16	7,21	6,20	6,95	9,90
K	mg/kg	10	22515,70	4685,49	1481,68	21953800,00	225157,00	0,21	22093,47	16980,00	23515,50	31999,00
Ni	mg/kg	10	1,37	0,78	0,25	0,61	13,65	0,57	1,22	0,82	0,92	3,20
P	mg/kg	10	3798,40	1108,50	350,54	1228770,00	37984,00	0,29	3648,99	1989,00	3599,50	5615,00
Pb	mg/kg	8	0,56	0,72	0,25	0,52	4,50	1,28	0,35	0,11	0,33	2,30
SPAD (Feld)		37	36,83	6,12	1,01	37,43	1362,75	0,17	36,33	23,10	36,60	49,50
Zn	mg/kg	10	62,97	30,56	9,67	934,15	629,74	0,49	57,23	31,60	53,40	118,40

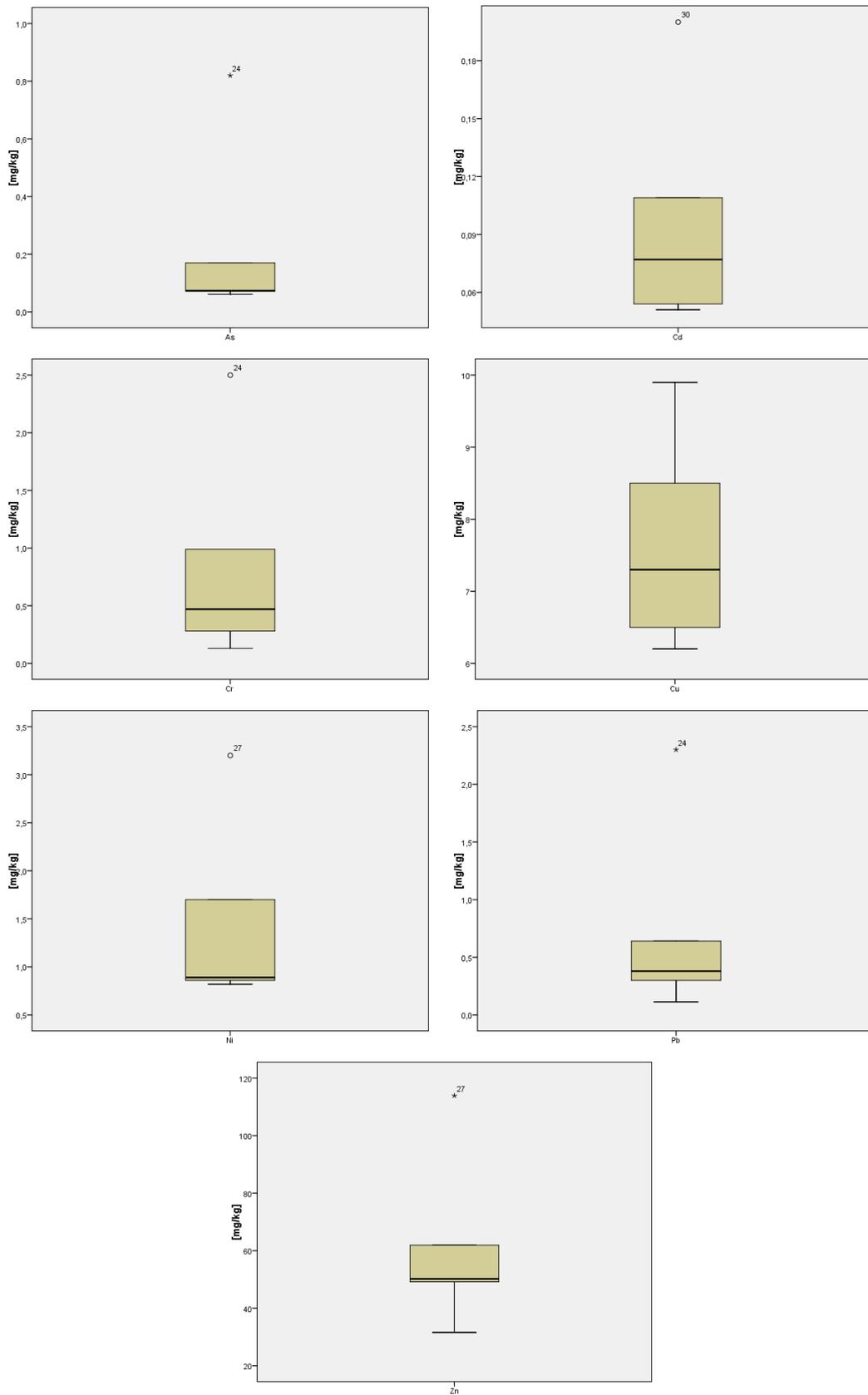


Abbildung Anh. 30: Boxplots der Schwermetallanalysen für As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn des Feldversuchs 2007 und 2008.

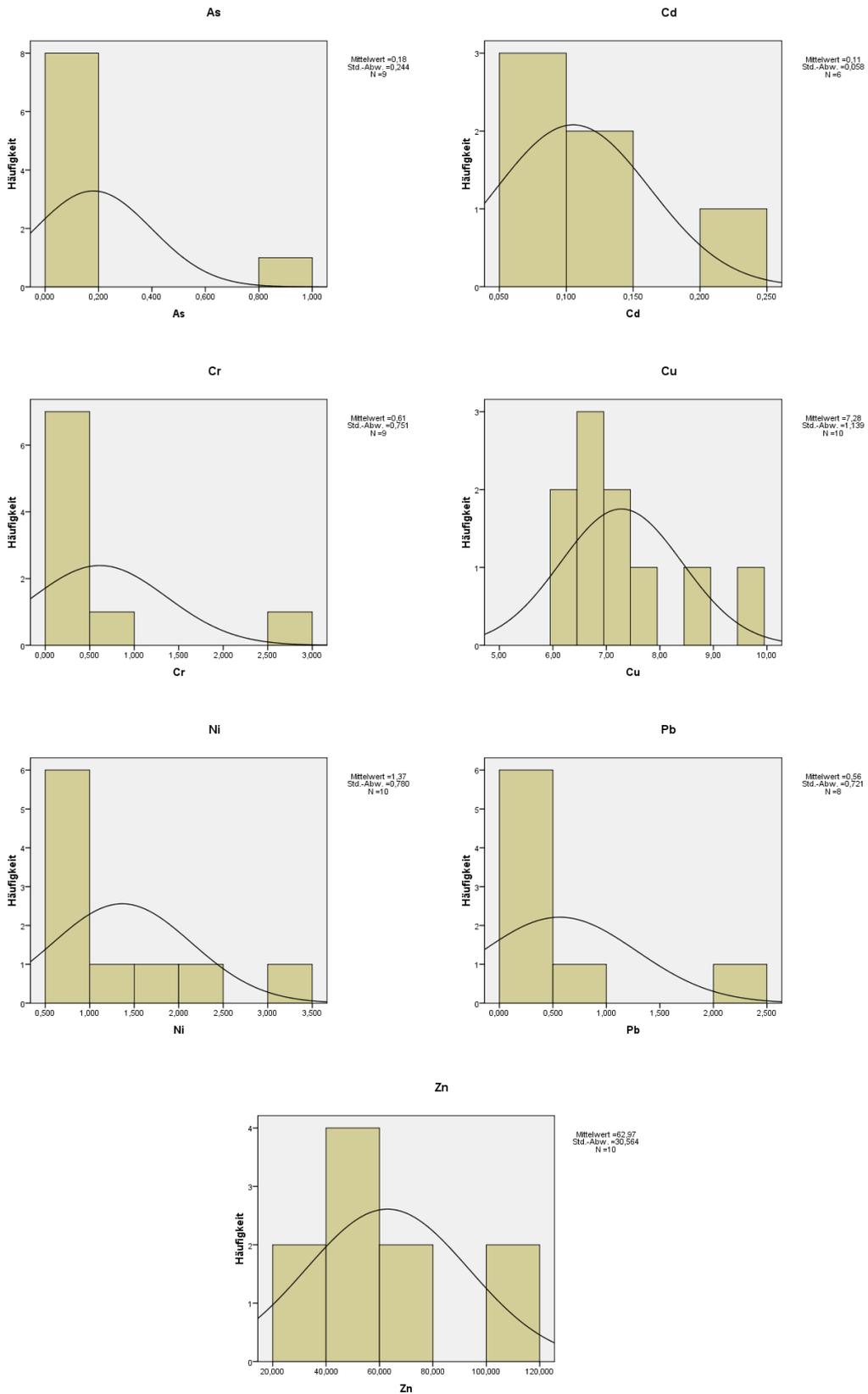


Abbildung Anh. 31: Histogramm mit Normalverteilung der Schwermetallanalysen für As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn des Feldversuchs 2007 und 2008.

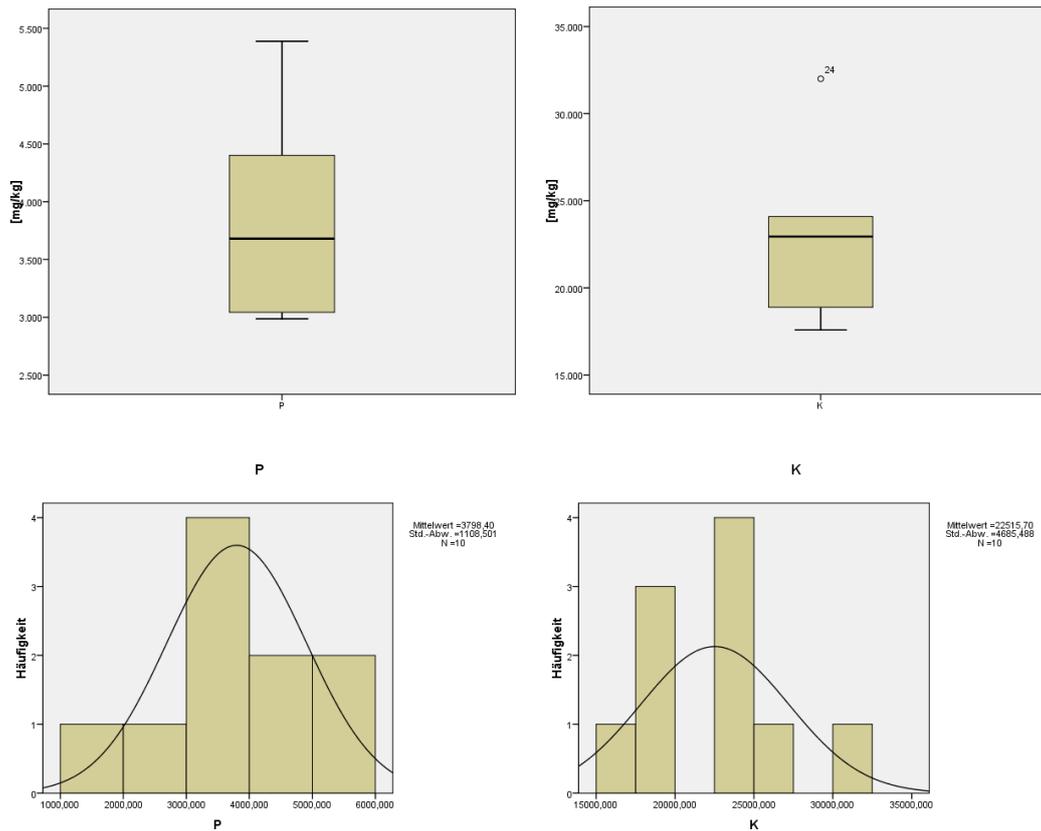


Abbildung Anh. 32: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilung der Nährstoffanalysen für P und K des Feldversuchs 2007 und 2008.

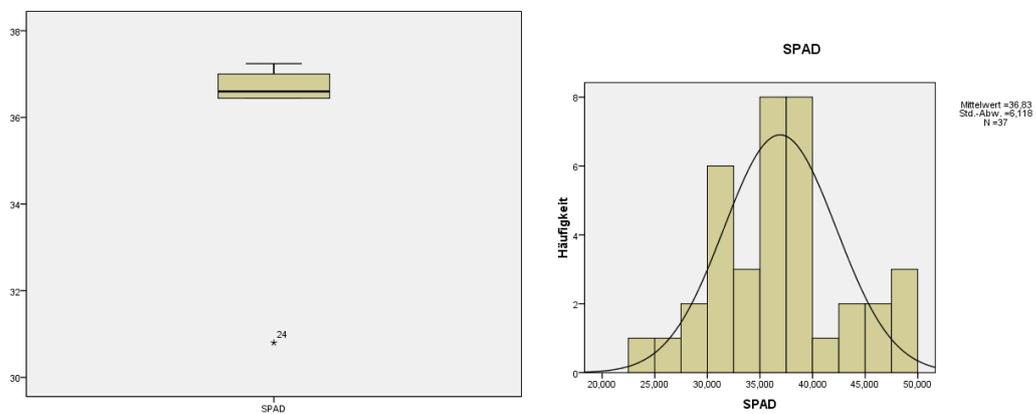


Abbildung Anh. 33: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilung der Chlorophyllmessungen (SPAD) des Feldversuchs 2007 und 2008.

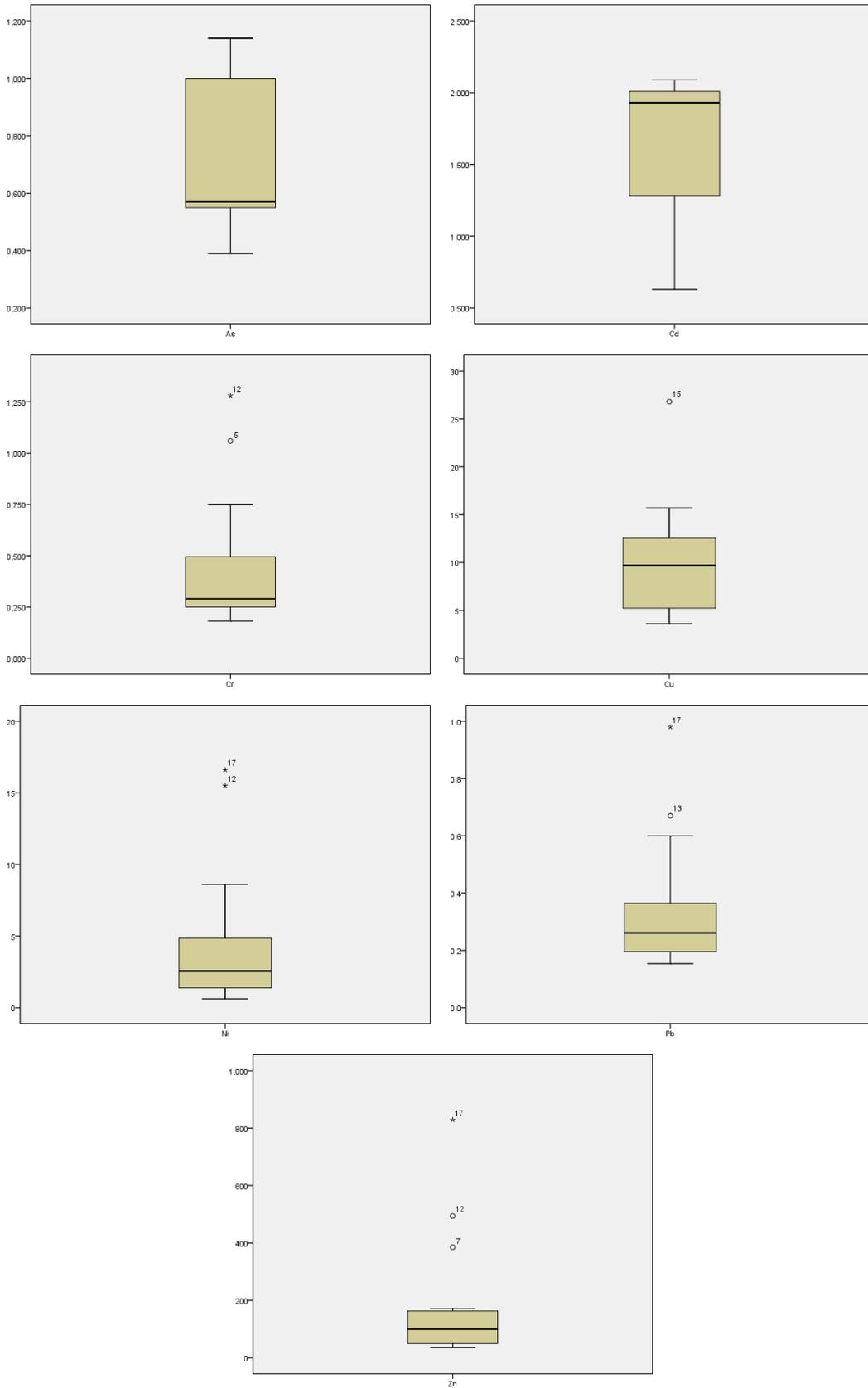


Abbildung Anh. 34: Boxplots der Schwermetallanalysen für As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn der HyMap 2008-Kampagne.

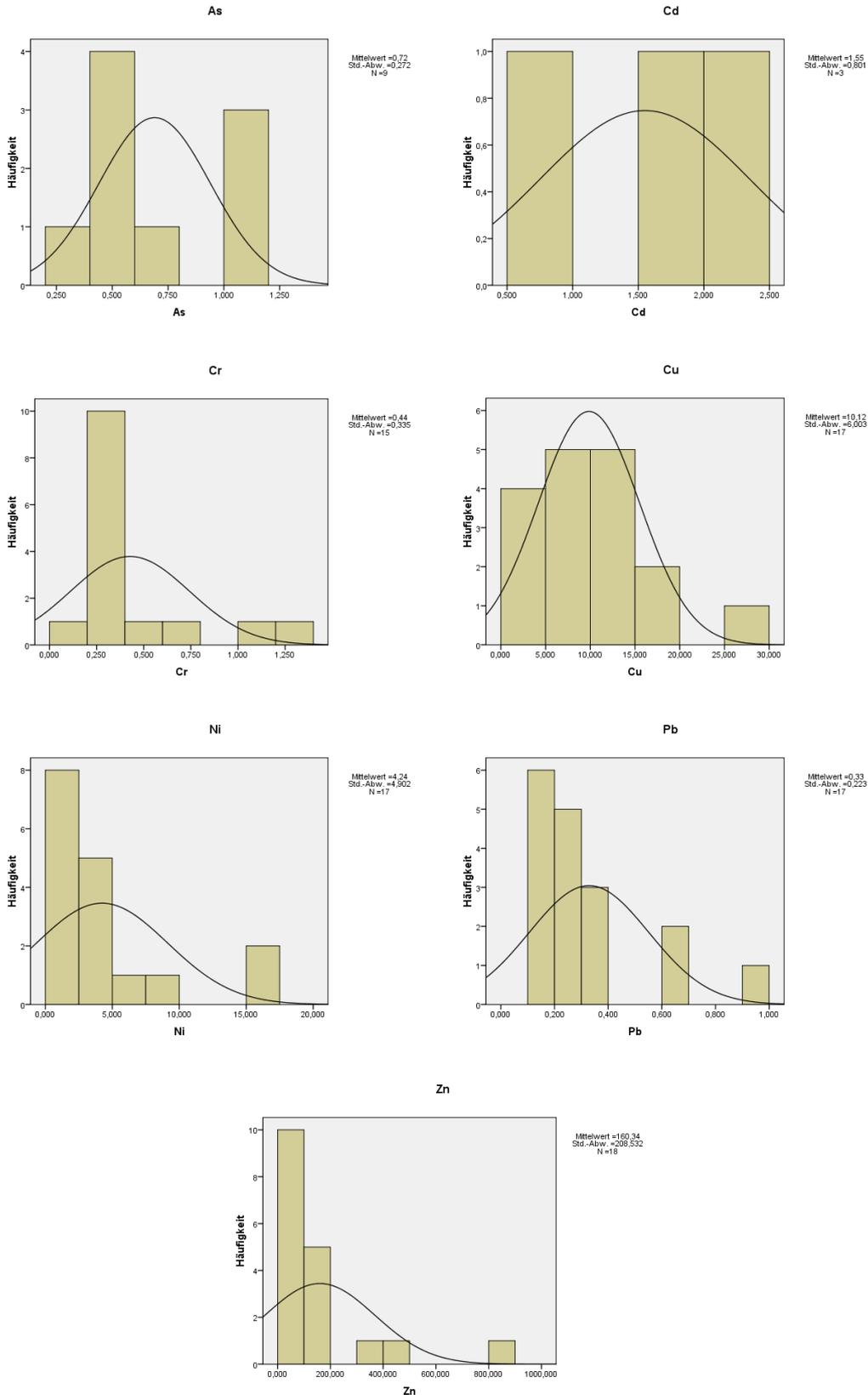


Abbildung Anh. 35: Histogramm mit Normalverteilung der Schwermetallanalysen für As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn der HyMap 2008-Kampagne.

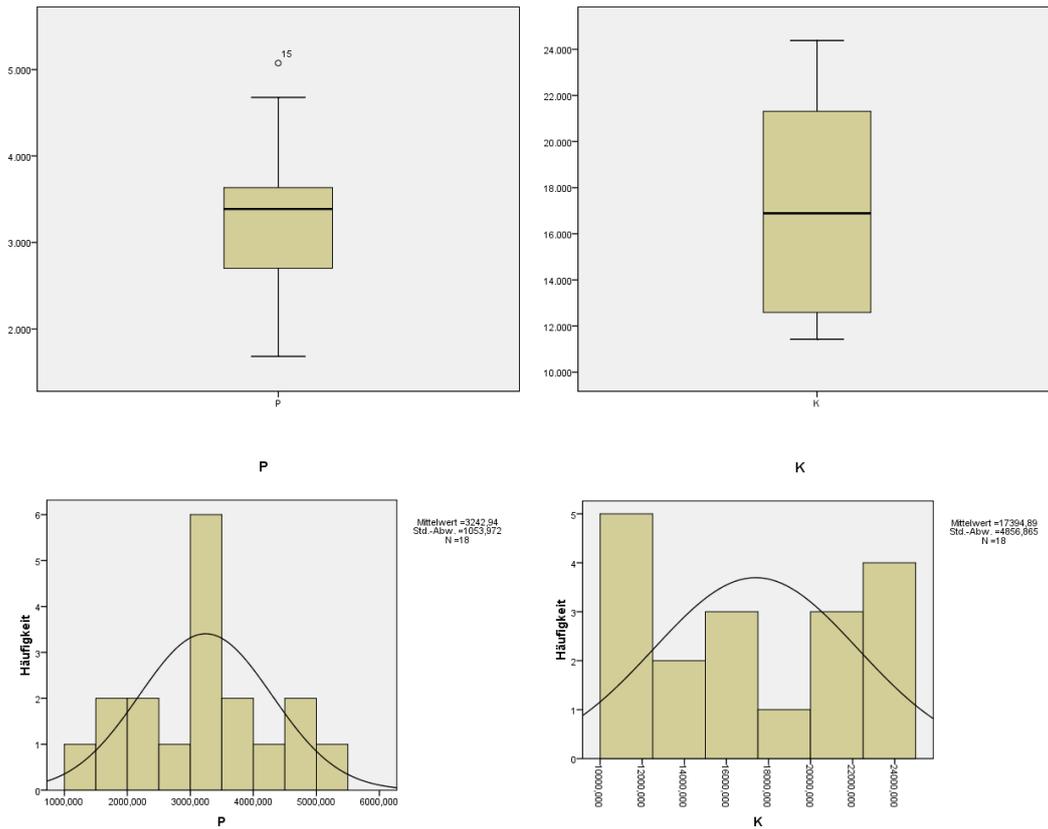


Abbildung Anh. 36: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilung der Nährstoffanalysen für P und K der HyMap 2008-Kampagne.

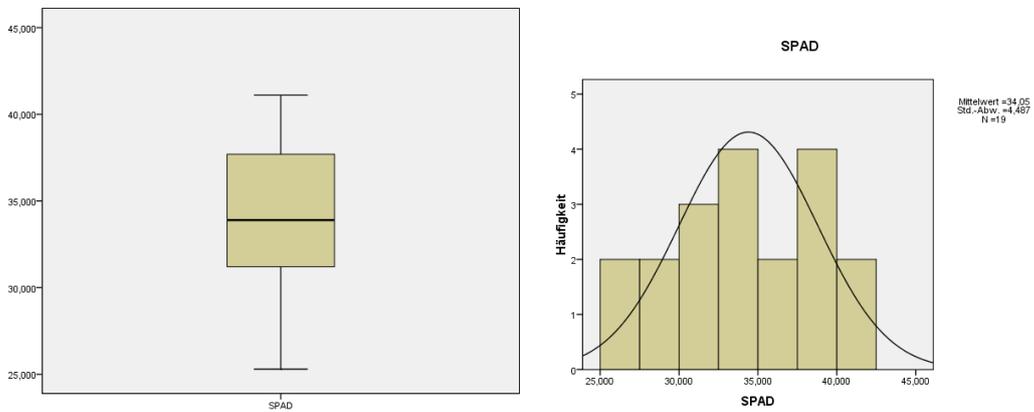


Abbildung Anh. 37: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilung der Chlorophyllmessungen (SPAD) der HyMap 2008-Kampagne.

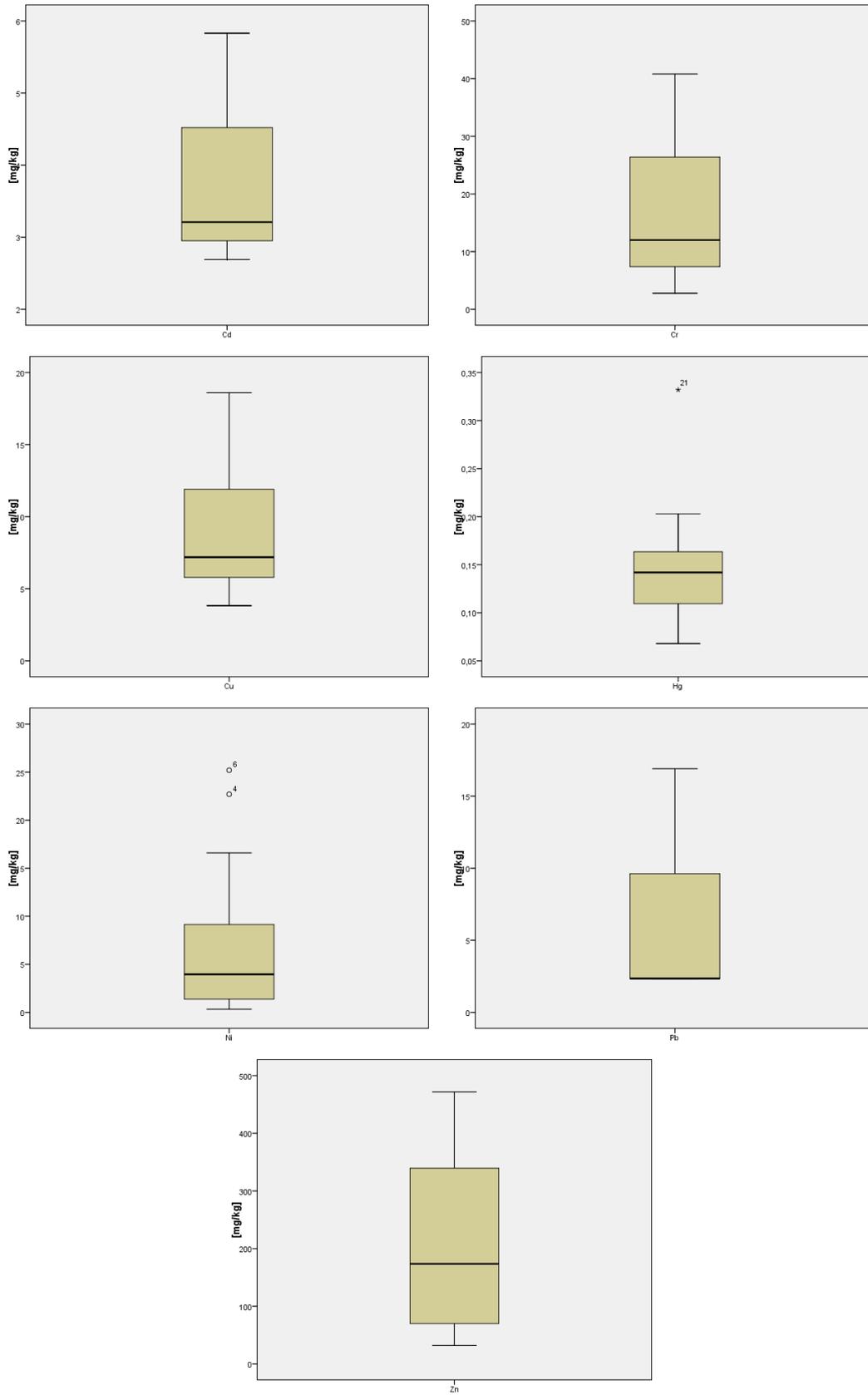


Abbildung Anh. 38: Boxplots der Schwermetallanalysen für Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn der HyMap 2009-Kampagne.

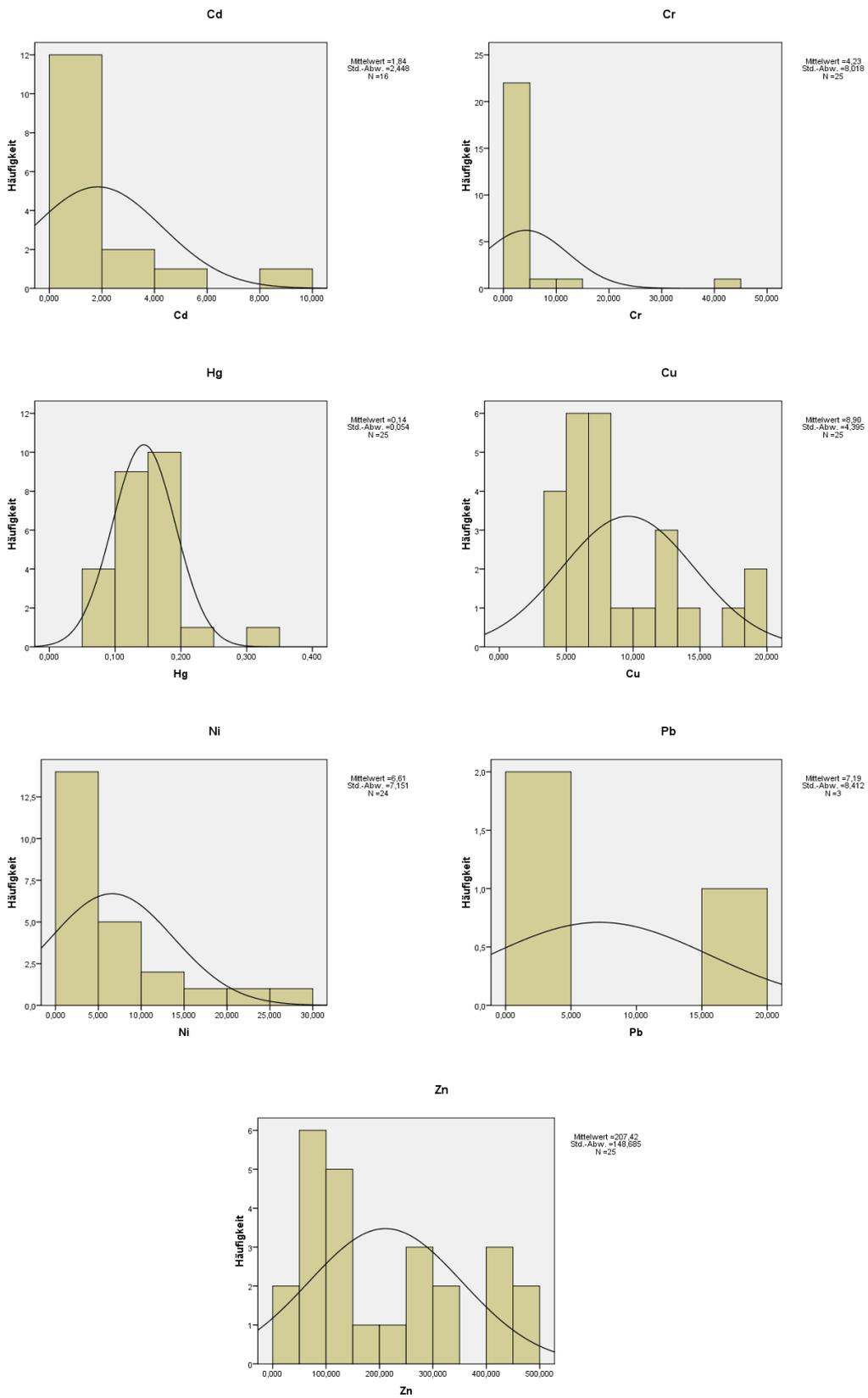


Abbildung Anh. 39: Histogramm mit Normalverteilung der Schwermetallanalysen für Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn der HyMap 2009-Kampagne.

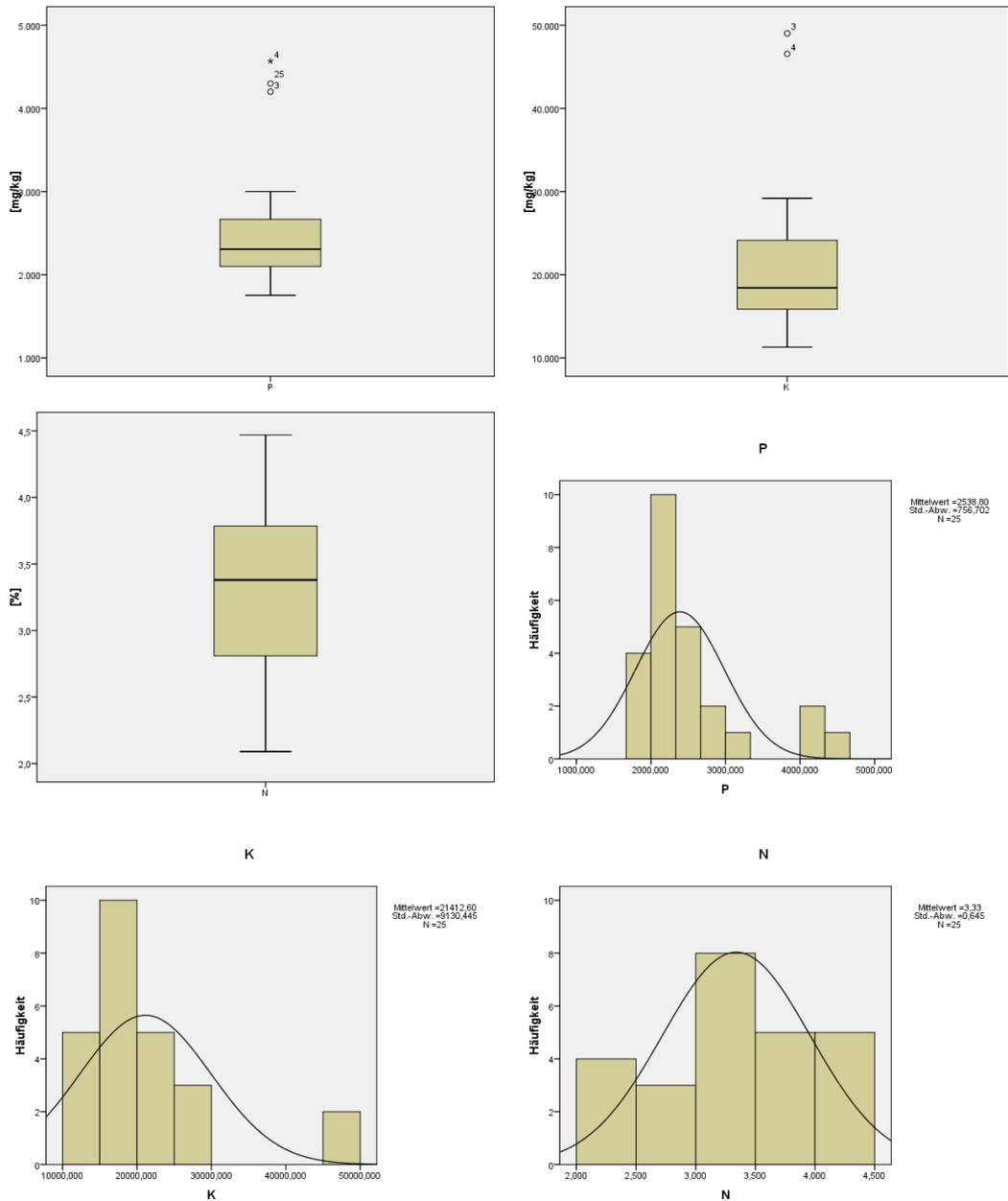


Abbildung Anh. 40: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilung der Nährstoffanalysen für P und K der HyMap 2009-Kampagne.

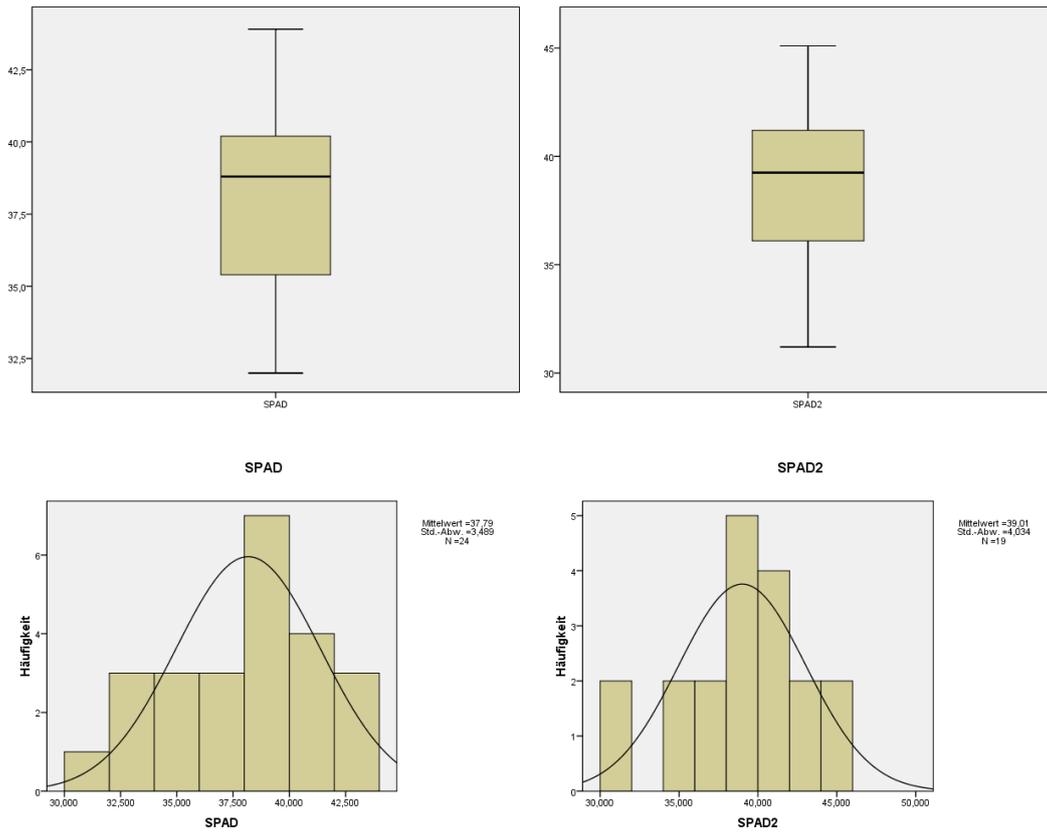


Abbildung Anh. 41: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilung der Chlorophyllmessungen (SPAD) der HyMap 2009-Kampagne.

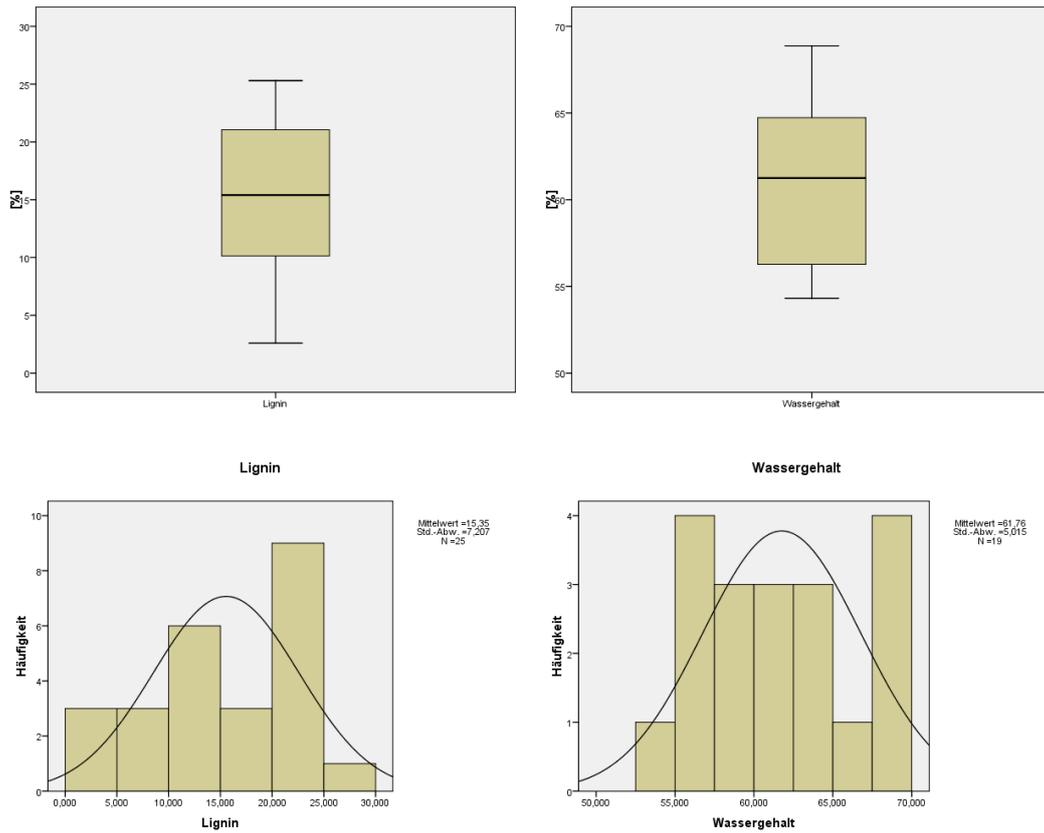


Abbildung Anh. 42: Boxplots und Histogramm mit Normalverteilung der Lignin- und Wassergehaltmessungen der HyMap 2009-Kampagne.

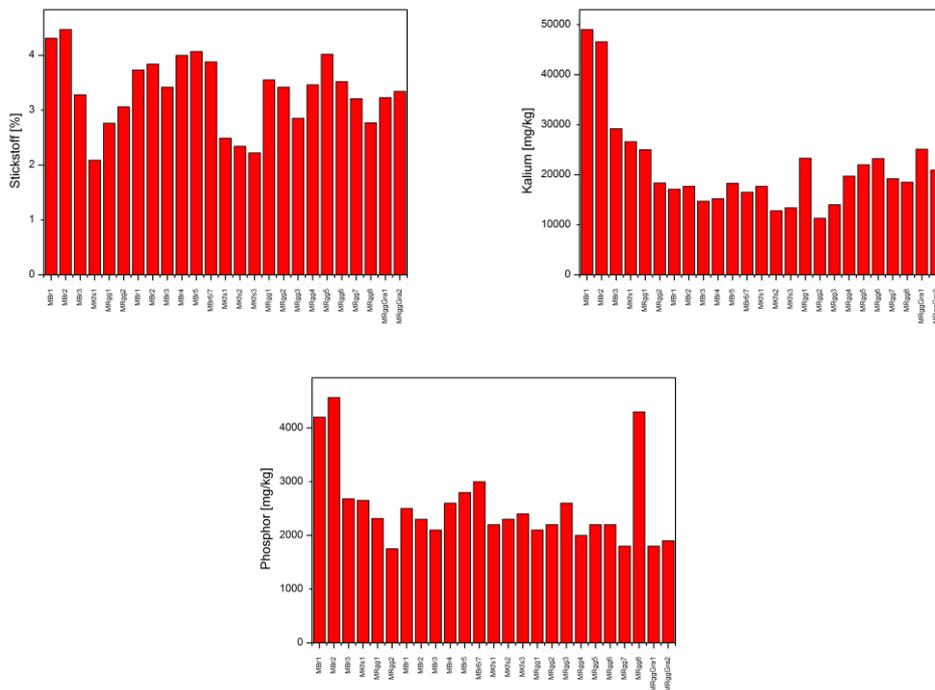


Abbildung Anh. 43: Nährstoffgehaltverteilung für P, K und N [mg/kg] nach Standorten der HyMap 2009-Kampagne.

Tabelle Anh. 7: Anwendbarkeit von Methoden der Parametrisierung von Fernerkundungsdaten (HyMap, AISA Eagle, Landsat 7 ETM+).

Methoden	HyMap	AISA Eagle	Landsat 7 ETM+
Anthocyanin Content Index (ACI)	X	X	*
Anthocyanin reflectance index (ARI)	X	X	*
Carter Index 1 (Ctr1)	X	X	*
Carter Index 2 (Ctr2)	X	X	
Cellulose Absorption Index (CAI)	X		
Continuum removal analysis at 1350 nm (CR1350)	X		
Continuum removal analysis at 1725 nm (CR1725)	X		
Continuum removal analysis at 970 nm (CR970)	X		
Disease Water Stress Index 5 (DWSI-5)	X		X
Edge-green first derivative normalized difference (EGFN)	X	X	
GR1140	X		
GR1890	X		
GRatio 1	X	X	
GRatio 2	X		
Green Peak Reflexionswert (GP)	X	X	X
Green-green first derivative normalized difference (GGFN)	X	X	
Leaf Chlorophyll Index (LCI)	X	X	
Lignin Cellulose Absorption Index (LCA)	X		
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI)	X	X	
Modified Normalized difference index (mND705)	X	X	
Moisture Stress Index (MSI)	X		*
Normalized Difference Infrared Index (NDII)	X		*
Normalized Difference Lignin Index (NDLI)	X		
Normalized Difference Moisture Index (NDMI)	X		*
Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI)	X		
Normalized Difference Pigment Index (NDPI)	X	X	*
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	X	X	X
Normalized Difference Water Index (NDWI)	X		
Normalized Phaeophytinization Index (NPQI)	X	X	
Normalized Pigment Chlorophyll Index (NPCI)	X	X	
Photochemical Reflectance Index (PRI)	X	X	
Pigment-specific Normalised Difference Index PSNDc	X	X	
Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)	X	X	
Ratio Vegetation Index (RVI)	X	X	X
Red Trough Reflexionswert (RT)	X	x	X
Red-edge Vegetation Stress Index (RVSI)	X	X	
Red-Edge-Position (1. Derivation)	X	X	
Red-Edge-Position (lineares Model)	X	X	
Simple Ratio Pigment Index (SRPI)	X	X	
Structurally independent xanthophyll index (SIXI)	X	X	*
Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)	X	X	*
Water Band Index (WBI)	X		

*theoretisch möglich durch starke Anpassung an Sensor, keine methodische Sicherheit

Tabelle Anh. 8: Variationskoeffizient Cv [%] der Methoden in der Gefäßversuchsreihe 2007 im gesamten Messzeitraum 2008 aller Pflanzen.

BR = Große Brennnessel (*Urtica dioica*), BF = Gemeiner Beifuß (*Artemisia vulgaris*),
 RGG = Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*), WFS = Wiesenfuchsschwanz (*Alopecurus pratensis*),
 KFS = Knickfuchsschwanz (*Alopecurus geniculatus*)

Cv Gesamt	BR	BF	RGG	WFS	KFS	MW
ACI	17,55	10,44	7,67	21,10	28,88	17,13
ARI	91,82	121,81	246,93	71,60	69,48	120,33
CAI	52,50	36,93	53,02	1356,59	404,77	380,76
CR1350	20,00	25,00	30,00	25,00	20,00	24,00
CR1725	106,69	154,82	122,87	156,66	134,62	135,13
CR970	24,00	25,00	25,69	25,00	24,00	24,74
Ctr1	35,54	28,68	27,50	27,32	24,33	28,67
Ctr2	36,94	37,79	36,62	48,14	63,83	44,67
DSWI5	7,44	7,55	5,42	17,58	25,21	12,64
EGFN	5,63	5,24	8,64	7,56	16,26	8,67
GGFN	35,24	28,38	26,40	39,28	58,76	37,61
GP	16,53	21,17	29,50	21,16	30,10	23,69
GR1140	11,39	8,81	8,58	11,54	10,20	10,10
GR1890	11,79	22,69	19,46	43,42	48,55	29,18
GRatio 1	7,32	2,73	1,97	10,15	4,14	5,26
GRatio 2	0,06	0,06	0,07	0,14	0,19	0,11
LCA	11,31	11,66	11,17	14,01	10,37	11,70
LCI	23,44	20,67	22,61	23,20	39,91	25,97
MCARI	25,74	36,47	36,29	28,47	50,11	35,42
mND705	29,58	23,71	23,92	29,77	41,14	29,63
MSI	6,24	10,14	7,93	18,90	21,98	13,04
NDII	17,26	19,39	14,69	36,58	38,09	25,20
NDLI	12,94	8,95	6,88	7,67	17,01	10,69
NDMI	16,37	18,97	14,56	34,45	36,85	24,24
NDNI	13,07	12,21	7,43	8,02	20,39	12,22
NDPI	69,33	71,79	105,47	72,67	79,14	79,68
NDVI	9,55	5,66	7,03	16,17	33,59	14,40
NDWI	77,13	42,59	22,53	99,59	67,58	61,89
NPCI	65,96	60,32	82,70	66,19	74,94	70,02
NPQI	41,01	17,83	33,22	24,44	42,43	31,79
PRI	19,04	27,56	62,87	63,31	66,99	47,95
PSNDc	50,72	64,45	57,75	49,99	52,33	55,05
PSRI	184,22	278,43	131,11	158,14	132,16	176,81
REP (Deriv)	0,48	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
REP (Lin)	0,44	0,45	0,44	0,45	0,44	0,44
RT	26,17	24,08	33,57	58,71	76,13	43,73
RVI	33,58	25,52	27,80	43,28	66,46	39,33
RVSI	38,69	23,58	11,81	23,08	36,19	26,67
SIPi	5,25	3,55	4,71	9,42	19,53	8,49
SIXI	11,64	11,01	14,43	11,93	20,42	13,89
SRPI	28,24	14,54	16,18	28,38	37,40	24,95
WBI	1,58	1,59	1,11	2,78	3,18	2,05

Tabelle Anh. 9: Variationskoeffizient Cv [%] der Methoden in der Gefäßversuchsreihe 2007 zwischen den Bodentypen (A, B, C) im Messzeitraum 2008 aller Pflanzen.

BR = Große Brennnessel (*Urtica dioica*), BF = Gemeiner Beifuß (*Artemisia vulgaris*),
 RGG = Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*), WFS = Wiesenfuchsschwanz (*Alopecurus pratensis*),
 KFS = Knickfuchsschwanz (*Alopecurus geniculatus*)

Cv Time	BR	BF	RGG	WFS	KFS	MW
ACI	6,11	3,15	2,06	6,30	7,41	5,01
ARI	33,74	288,88	628,28	61,15	64,75	215,36
CAI	31,39	32,25	32,11	143,91	57,55	59,44
CR1350	14,00	16,00	13,00	18,00	12,00	14,60
CR1725	51,06	39,34	50,09	36,46	62,79	47,95
CR970	12,00	15,00	15,65	18,00	12,00	14,53
Ctr1	10,20	9,07	6,18	10,59	12,68	9,75
Ctr2	10,20	8,61	7,17	11,41	17,81	11,04
DSW15	3,98	2,91	3,82	7,61	11,72	6,01
EGFN	3,55	3,22	4,08	3,48	9,09	4,69
GGFN	12,16	5,71	4,87	12,72	27,07	12,51
GP	12,83	12,82	10,25	8,29	7,27	10,29
GR1140	6,59	6,33	6,20	7,28	9,75	7,23
GR1890	9,92	11,62	13,42	16,10	14,18	13,05
GRatio 1	3,32	1,13	0,95	3,21	1,84	2,09
GRatio 2	0,03	0,05	0,04	0,10	0,15	0,07
LCA	6,36	7,72	7,27	7,24	8,09	7,33
LCI	7,65	5,76	5,72	6,71	17,30	8,63
MCARI	21,69	18,28	13,79	20,03	30,77	20,91
mND705	9,09	6,53	5,43	7,44	18,59	9,41
MSI	3,09	3,72	5,39	8,79	11,83	6,56
NDII	8,72	7,52	9,97	23,88	26,41	15,30
NDLI	5,87	5,92	5,93	6,69	11,34	7,15
NDMI	8,11	7,43	9,88	21,87	25,49	14,55
NDNI	5,30	5,61	4,95	6,57	12,12	6,91
NDPI	24,36	20,10	70,13	28,16	40,38	36,63
NDVI	3,45	1,56	1,54	4,88	14,27	5,14
NDWI	467,76	18,68	14,82	41,27	71,59	122,82
NPCI	19,53	16,38	18,21	23,39	32,34	21,97
NPQI	23,93	11,23	30,02	13,87	28,95	21,60
PRI	15,04	10,97	23,99	26,78	24,61	20,28
PSNDc	17,62	18,45	20,10	18,74	16,87	18,36
PSRI	77,33	171,25	44,43	119,24	138,58	110,16
REP (Deriv)	0,18	0,22	0,21	0,19	0,18	0,20
REP (Lin)	0,11	0,22	0,14	0,11	0,11	0,14
RT	11,54	10,70	11,05	14,71	16,55	12,91
RVI	11,75	7,96	7,46	14,73	24,02	13,18
RVSI	13,62	5,83	8,09	14,33	26,37	13,65
SIPI	1,90	1,50	1,38	3,11	6,95	2,97
SIXI	4,67	3,77	3,76	3,76	7,71	4,74
SRPI	9,83	3,95	2,45	9,31	11,47	7,40
WBI	0,73	0,46	0,67	1,10	1,78	0,95

Tabelle Anh. 10: Variationskoeffizient Cv [%] der Methoden in der Gefäßversuchsreihe 2007 im Messzeitraum 2008 (aufgeschlüsselt) aller Pflanzen.

Methoden	09.04.08	30.04.2008	14.05.2008	28.05.2008	21.06.2008	15.07.2008	11.08.2008
ACI	2,85%	4,01%	2,29%	6,59%	7,23%	6,09%	5,46%
ARI	78,44%	309,99%	453,82%	504,33%	37,20%	53,29%	84,59%
CAI	27,87%	32,03%	143,03%	94,15%	46,93%	30,63%	39,45%
CR1350	12,00%	13,40%	13,00%	14,00%	15,00%	14,00%	10,00%
CR1725	50,56%	40,57%	46,66%	47,56%	51,60%	54,06%	36,43%
CR970	12,20%	12,50%	14,00%	14,50%	15,50%	15,00%	12,00%
Ctr1	5,84%	9,18%	10,40%	12,03%	9,66%	9,04%	12,50%
Ctr2	10,00%	7,05%	12,33%	13,41%	13,60%	10,39%	8,19%
DSWI5	5,06%	4,55%	6,34%	4,78%	10,20%	4,12%	6,44%
EGFN	4,55%	3,74%	11,64%	3,14%	3,26%	2,74%	4,60%
GGFN	8,45%	7,80%	16,52%	16,41%	14,66%	12,61%	5,45%
GP	9,71%	7,34%	9,32%	11,33%	15,10%	7,49%	12,89%
GR1140	7,55%	5,17%	6,63%	7,89%	11,21%	4,96%	6,58%
GR1890	15,31%	14,24%	12,51%	12,46%	16,45%	9,54%	10,01%
GRatio 1	2,05%	1,49%	1,00%	1,22%	4,13%	2,70%	1,69%
GRatio 2	0,11%	0,04%	0,09%	0,05%	0,09%	0,06%	0,08%
LCA	7,83%	7,16%	5,77%	5,41%	10,25%	8,49%	5,90%
LCI	5,69%	4,46%	12,50%	11,34%	10,18%	5,84%	8,99%
MCARI	11,18%	21,44%	29,35%	13,89%	29,09%	16,58%	23,93%
mND705	4,96%	5,32%	13,49%	13,20%	12,11%	6,92%	7,27%
MSI	7,81%	5,08%	7,13%	5,67%	9,43%	3,76%	6,82%
NDII	12,94%	19,02%	17,90%	14,03%	20,90%	7,29%	13,34%
NDLI	4,57%	6,14%	8,17%	8,70%	9,62%	5,13%	7,15%
NDMI	12,84%	16,79%	17,30%	13,60%	19,87%	6,85%	13,17%
NDNI	4,50%	6,28%	8,44%	8,60%	9,17%	4,06%	6,38%
NDPI	59,53%	62,01%	26,45%	23,76%	27,70%	29,89%	23,52%
NDVI	1,81%	3,73%	9,34%	5,75%	7,47%	2,85%	2,49%
NDWI	20,72%	22,21%	52,60%	34,53%	78,96%	522,72%	33,57%
NPCI	28,56%	19,51%	16,78%	20,36%	22,17%	24,74%	18,81%
NPQI	29,96%	31,68%	21,23%	13,21%	18,43%	14,86%	18,76%
PRI	32,21%	21,88%	22,61%	13,47%	17,53%	16,94%	15,67%
PSNDc	23,36%	20,77%	17,29%	15,62%	14,68%	14,41%	25,76%
PSRI	248,67%	200,75%	13,39%	57,81%	75,63%	81,49%	83,70%
REP (Deriv)	0,11%	0,13%	0,15%	0,13%	0,19%	0,18%	15,00%
REP (Lin)	0,08%	0,11%	0,11%	0,12%	0,16%	0,15%	0,07%
RT	12,50%	11,05%	9,41%	14,91%	20,49%	10,10%	10,49%
RVI	9,76%	11,74%	11,55%	12,80%	21,95%	11,04%	10,47%
RVSI	13,12%	9,63%	19,31%	13,88%	19,55%	7,99%	6,75%
SIPI	1,71%	2,69%	3,99%	2,94%	4,48%	1,74%	2,43%
SIXI	2,22%	1,96%	4,20%	2,10%	3,34%	1,64%	6,69%
SRPI	3,20%	4,67%	6,71%	9,30%	13,05%	7,89%	4,55%
WBI	0,89%	0,85%	0,77%	0,73%	1,62%	0,81%	0,78%
GEOMW	7%	7%	9%	8%	10%	7%	8%
Anzahl Max	4	2	7	1	20	2	3

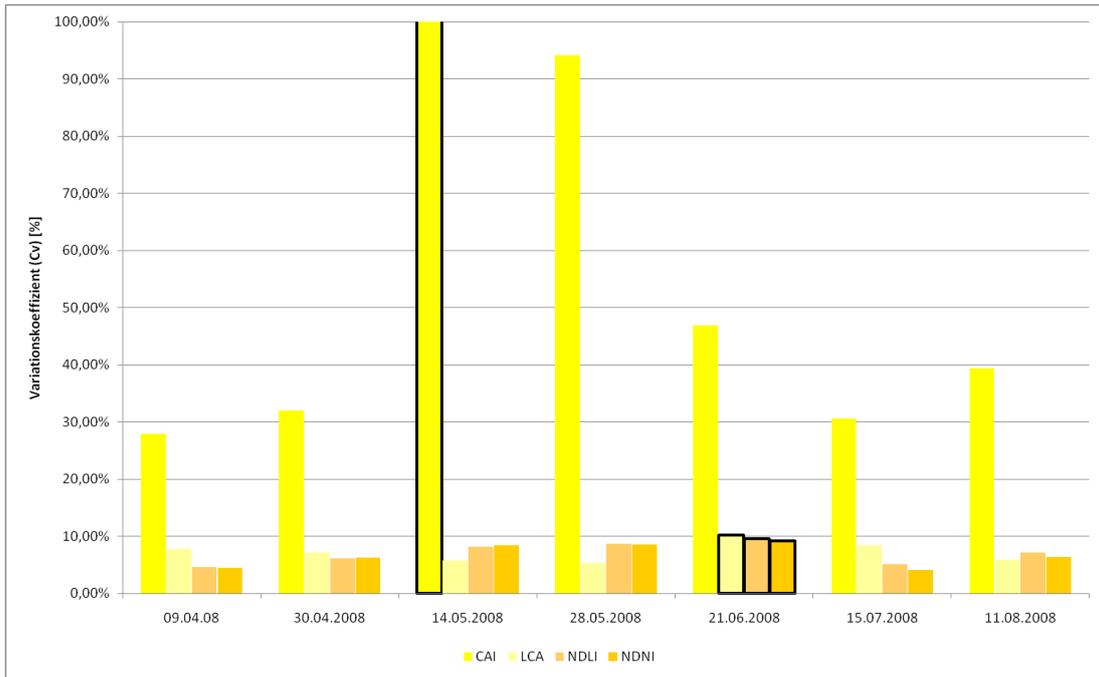


Abbildung Anh. 44: Variationskoeffizienten der untersuchten Biochemieindizes der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

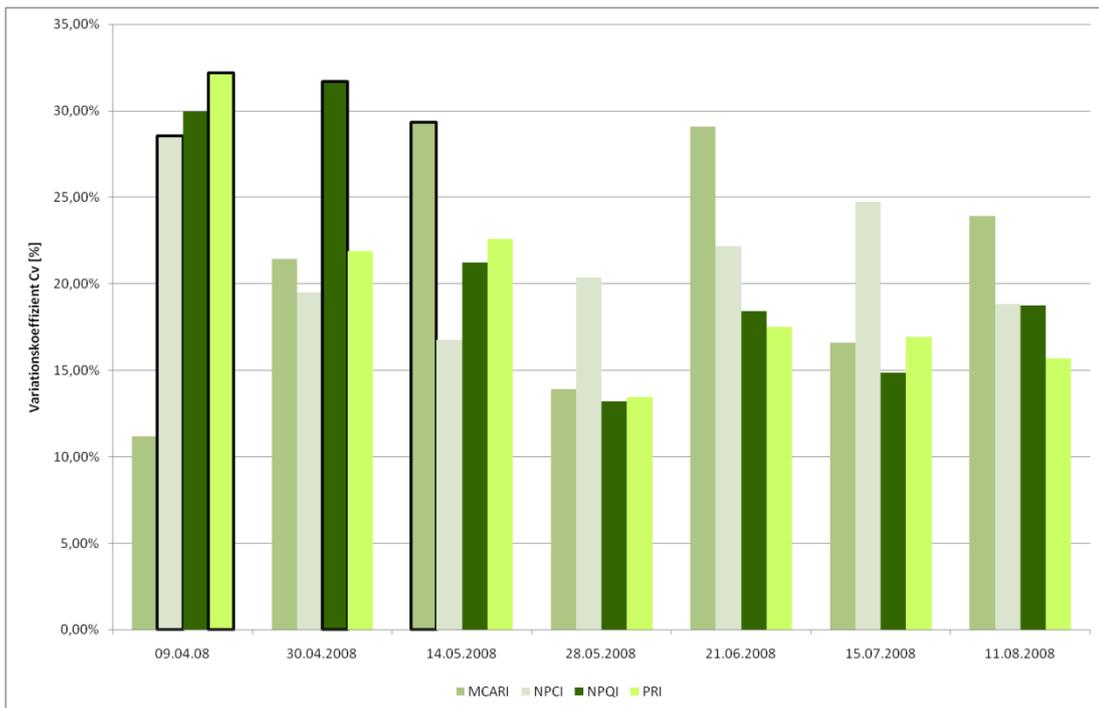


Abbildung Anh. 45: Variationskoeffizienten der untersuchten Pigmentindizes der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 – Teil 1.

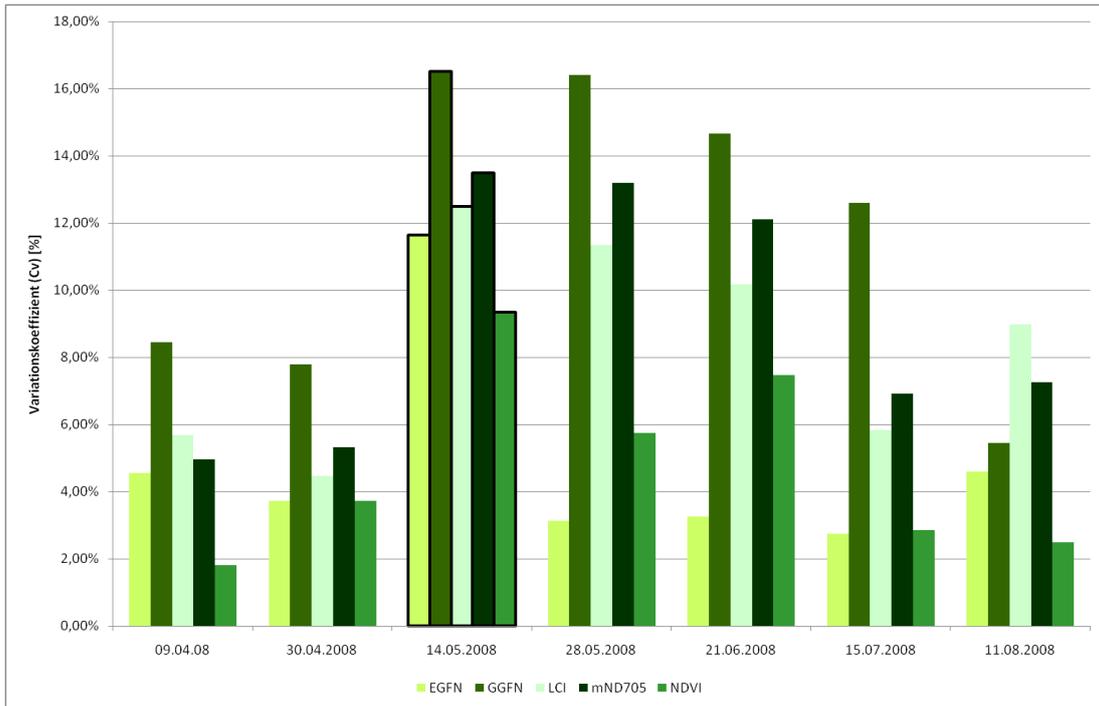


Abbildung Anh. 46: Variationskoeffizienten der untersuchten Pigmentindizes der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 – Teil 2.

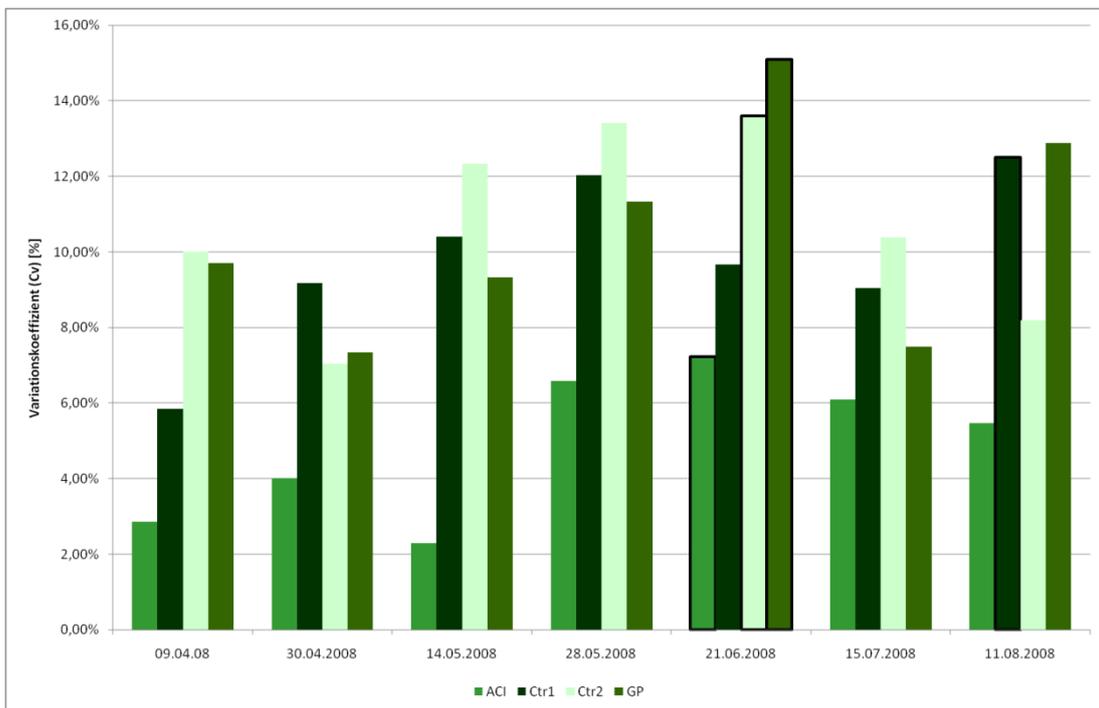


Abbildung Anh. 47: Variationskoeffizienten der untersuchten Pigmentindizes der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008 – Teil 3.

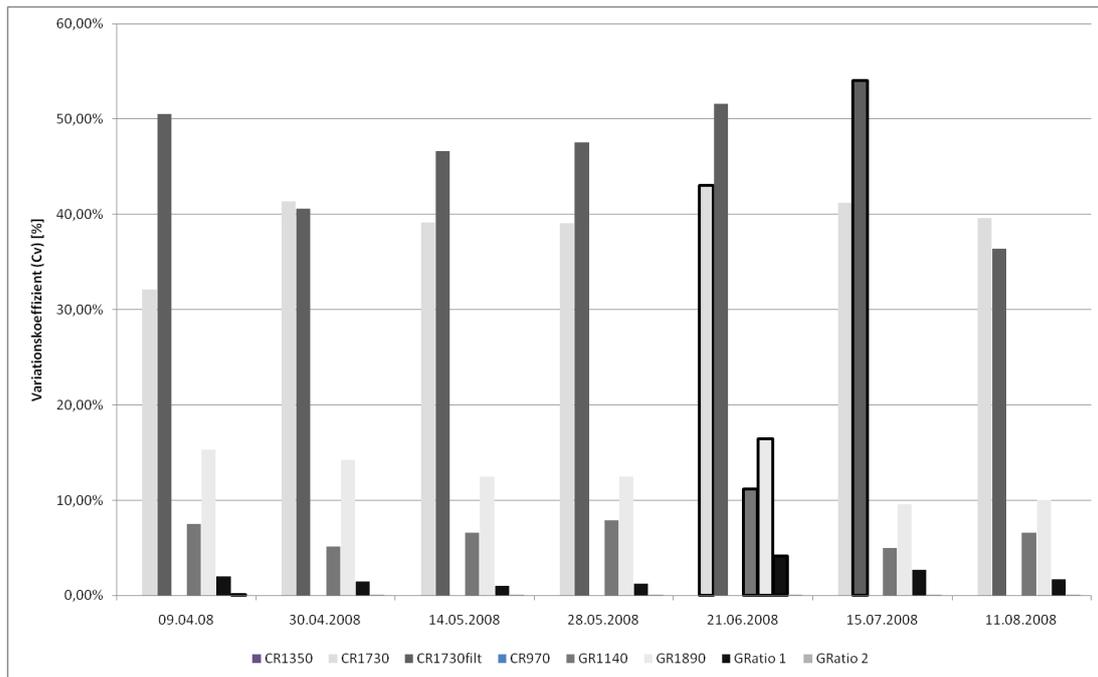


Abbildung Anh. 48: Variationskoeffizienten der entwickelten Methoden der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008

5.4.1

Tabelle Anh. 11: Interkorrelationen (Pearson und Spearman Korrelationskoeffizient) zwischen den untersuchten Parametern der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

Element	Korrelationskoeffizient	As	Cd	Cr	Cu	K	Ni	P	Pb	SPAD	Zn
As	Pearson	1									
Cd	Pearson	0,37239	1								
Cr	Pearson	0,50084	-0,1056	1							
Cu	Pearson	0,49919	0,58235	0,24524	1						
K	Pearson	-0,13724	0,68072	-0,48384	0,19051	1					
Ni	Pearson	0,44541	0,42182	0,26797	0,3343	0,08454	1				
P	Pearson	-0,14401	0,2669	-0,09294	0,08042	0,47044	0,08279	1			
Pb	Pearson	0,46609	-0,20677	0,59577	0,1042	-0,26508	0,24121	-0,22603	1		
SPAD	Pearson	-0,24811	0,5606	-0,41303	0,20127	0,62319	-0,04848	0,34516	-0,34164	1	
Zn	Pearson	0,25045	0,06184	0,19415	0,06405	0,13601	0,02427	0,15694	0,20377	-0,12754	1
Element	Korrelationskoeffizient	As	Cd	Cr	Cu	K	Ni	P	Pb	SPAD	Zn
As	Spearman	1									
Cd	Spearman	0,31566	1								
Cr	Spearman	0,56226	-0,21335	1							
Cu	Spearman	0,59242	0,69178	0,22002	1						
K	Spearman	-0,19508	0,62485	-0,67305	0,24007	1					
Ni	Spearman	0,51802	0,52932	0,29266	0,48277	0,144	1				
P	Spearman	-0,25907	0,12841	-0,16572	0,03581	0,32432	0,05019	1			
Pb	Spearman	0,86457	-0,19348	0,58171	0,42406	-0,27609	0,53184	-0,32125	1		
SPAD	Spearman	-0,35533	0,56293	-0,47171	0,22283	0,50674	0,15629	0,28148	-0,46714	1	
Zn	Spearman	0,44469	-0,06223	0,14441	0,36711	0,09717	0,12817	0,06529	0,31787	-0,22199	1

Tabelle Anh. 12: Interkorrelationen (Pearson und Spearman Korrelationskoeffizient) zwischen den untersuchten Parametern der Gefäßversuchsreihe 2008 im Jahr 2008.

Element	Korrelationskoeffizient	As	Cd	Cr	Cu	K	Ni	P	Pb	SPAD	Zn
As	Pearson	1									
Cd	Pearson	0,56512	1								
Cr	Pearson	0,93923	0,50817	1							
Cu	Pearson	0,83827	0,696	0,86059	1						
K	Pearson	0,49354	0,6259	0,53681	0,78042	1					
Ni	Pearson	0,84997	0,68189	0,82867	0,82431	0,59066	1				
P	Pearson	0,4816	0,47403	0,46226	0,60411	0,5196	0,53116	1			
Pb	Pearson	0,73933	0,35957	0,72792	0,65774	0,46264	0,61967	0,42634	1		
SPAD	Pearson	0,32629	0,48485	0,31477	0,45818	0,36507	0,46054	0,48123	0,27517	1	
Zn	Pearson	0,4301	0,57402	0,38683	0,49464	0,52328	0,68876	0,306	0,28741	0,30764	1
Element	Korrelationskoeffizient	As	Cd	Cr	Cu	K	Ni	P	Pb	SPAD	Zn
As	Spearman	1									
Cd	Spearman	0,32144	1								
Cr	Spearman	0,5886	0,3719	1							
Cu	Spearman	0,3258	0,69627	0,36414	1						
K	Spearman	0,17238	0,69819	0,27831	0,81716	1					
Ni	Spearman	0,55503	0,64625	0,57868	0,5738	0,48054	1				
P	Spearman	0,51675	0,3602	0,51062	0,52573	0,31456	0,478	1			
Pb	Spearman	0,50903	0,29828	0,64135	0,33195	0,13974	0,42805	0,47631	1		
SPAD	Spearman	0,35419	0,47627	0,27397	0,5931	0,34199	0,52892	0,50923	0,4064	1	
Zn	Spearman	0,38991	0,67057	0,31205	0,52091	0,5762	0,73153	0,2356	0,14906	0,29359	1

Tabelle Anh. 13: Interkorrelationen (Pearson und Spearman Korrelationskoeffizient) zwischen den untersuchten Parametern HyMap-Kampagne 2008.

Element	Korrelationskoeffizient	As	Cr	Cu	K	Ni	P	Pb	SPAD	Zn
As	Pearson	1								
Cr	Pearson	-0,07083	1							
Cu	Pearson	0,28417	0,26804	1						
K	Pearson	-0,26221	0,27019	0,59529	1					
Ni	Pearson	-0,02723	0,66152	0,28668	0,134	1				
P	Pearson	0,16937	0,16295	0,75514	0,72672	0,12957	1			
Pb	Pearson	0,07146	0,73461	0,07622	-0,00639	0,86104	-0,0372	1		
SPAD	Pearson	--	0,47661	0,46841	0,02362	-0,10659	0,06416	0,19691	1	
Zn	Pearson	0,20344	0,49391	0,06511	-0,10234	0,85435	0,04425	0,82152	-0,3937	1
Element	Korrelationskoeffizient	As	Cr	Cu	K	Ni	P	Pb	SPAD	Zn
As	Spearman	1								
Cr	Spearman	-0,32336	1							
Cu	Spearman	-0,0251	0,37388	1						
K	Spearman	-0,41841	0,39678	0,62945	1					
Ni	Spearman	-0,28571	0,49451	0,55923	0,42892	1				
P	Spearman	0	0,05541	0,74847	0,66563	0,36275	1			
Pb	Spearman	-0,23431	0,63806	0,00884	-0,14951	0,44706	-0,2549	1		
SPAD	Spearman	--	0,09524	0,38494	0,10942	-0,04863	-0,00608	-0,06667	1	
Zn	Spearman	0,01674	0,28597	0,10675	0,09185	0,6299	0,06089	0,67157	-0,57143	1

Tabelle Anh. 14: Interkorrelationen (Pearson und Spearman Korrelationskoeffizient) zwischen den untersuchten Parametern HyMap-Kampagne 2009

Element	Korrelationskoeffizient	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	K [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Lignin [%]	Ni [mg/kg]	P [mg/kg]	Hg [mg/kg]	SPAD (Feld)	SPAD (Labor)	N [%]	Wassergehalt [%]	Zn [mg/kg]	
Cd [mg/kg]	Pearson	1													
Cr [mg/kg]	Pearson	0,58	1												
K [mg/kg]	Pearson	0,67	0,22	1											
Cu [mg/kg]	Pearson	0,56	0,50	0,45	1										
Lignin [%]	Pearson	-0,52	-0,22	-0,54	-0,36	1									
Ni [mg/kg]	Pearson	0,80	0,67	0,65	0,50	-0,75	1								
P [mg/kg]	Pearson	0,74	0,10	0,61	0,29	-0,49	0,52	1							
Hg [mg/kg]	Pearson	-0,32	0,00	-0,35	0,03	0,50	-0,35	-0,33	1						
SPAD (Feld)	Pearson	0,04	0,07	0,03	0,32	0,33	-0,26	-0,22	0,52	1					
SPAD (Labor)	Pearson	0,02	0,16	0,23	0,36	0,47	-0,53	-0,26	0,30	0,84	1				
N [%]	Pearson	0,10	-0,42	0,42	0,13	-0,46	0,14	0,32	-0,25	0,03	-0,17	1			
Wassergehalt [%]	Pearson	-0,54	-0,47	0,10	0,11	-0,70	0,78	0,38	-0,26	-0,47	-0,41	0,75	1		
Zn [mg/kg]	Pearson	0,33	0,08	0,50	0,23	-0,87	0,68	0,36	-0,31	-0,35	-0,43	0,39	0,60	1	
Cd [mg/kg]	Spearman	1													
Cr [mg/kg]	Spearman	0,57	1												
K [mg/kg]	Spearman	0,32	0,38	1											
Cu [mg/kg]	Spearman	0,46	0,34	0,61	1										
Lignin [%]	Spearman	-0,46	-0,11	-0,33	-0,29	1									
Ni [mg/kg]	Spearman	0,64	0,24	0,27	0,25	-0,82	1								
P [mg/kg]	Spearman	0,68	0,04	0,10	0,13	-0,52	0,63	1							
Hg [mg/kg]	Spearman	-0,40	-0,24	-0,32	0,10	0,54	-0,42	-0,23	1						
SPAD (Feld)	Spearman	-0,17	0,03	0,05	0,45	0,22	-0,44	-0,27	0,51	1					
SPAD (Labor)	Spearman	-0,03	0,15	0,20	0,51	0,28	-0,41	-0,17	0,31	0,80	1				
N [%]	Spearman	-0,15	-0,38	0,20	0,12	-0,48	0,27	0,24	-0,19	0,10	-0,05	1			
Wassergehalt [%]	Spearman	-0,37	-0,44	0,07	-0,28	-0,61	0,71	0,44	-0,39	-0,48	-0,36	0,74	1		
Zn [mg/kg]	Spearman	0,36	0,12	0,16	0,17	-0,75	0,85	0,36	-0,41	-0,38	-0,35	0,32	0,50	1	

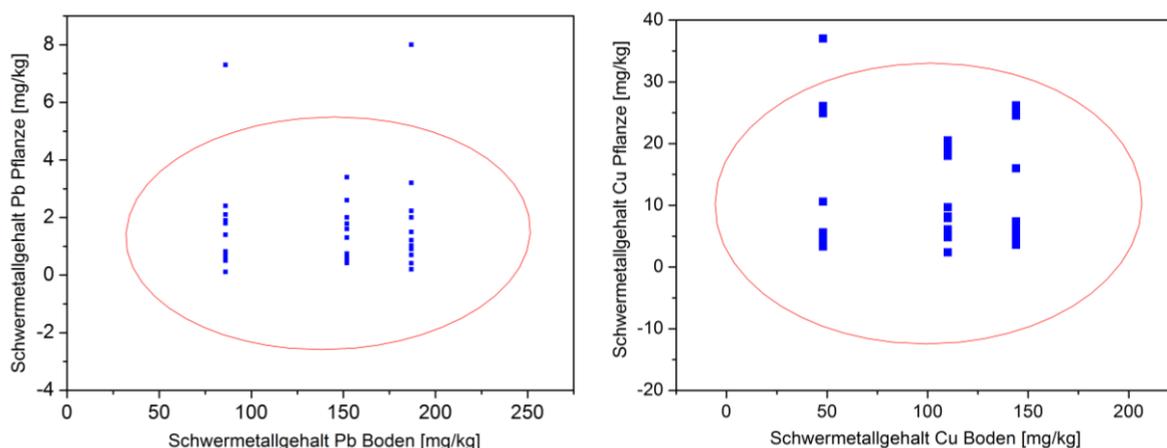


Abbildung Anh. 49: Beziehung zwischen dem Schwermetallgehalt Pb und Cu [mg/kg] des Bodens und der Pflanze der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

Tabelle Anh. 15: Korrelationskoeffizienten (nach Pflanzenart, Pearson) der Spektralmethoden und des relativen Chlorophyllgehalts (SPAD).

Method	Korrelationskoeffizient	BR	BF	RGG	WFS	MW
mND705	Pearson	0,917	0,676	0,900	0,938	0,858
GGFN	Pearson	0,849	0,724	0,906	0,936	0,854
Ctr1	Pearson	-0,879	-0,658	-0,926	-0,930	0,848
PSNDc	Pearson	-0,857	-0,664	-0,912	-0,958	0,848
SRPI	Pearson	0,880	0,650	0,905	0,927	0,840
NPCI	Pearson	-0,869	-0,640	-0,886	-0,910	0,826
LCI	Pearson	0,891	0,658	0,843	0,902	0,823
REP (Deriv)	Pearson	0,904	0,676	0,886	0,822	0,822
NDPI	Pearson	-0,864	-0,638	-0,876	-0,910	0,822
Ctr2	Pearson	-0,921	-0,665	-0,805	-0,863	0,814
ARI	Pearson	-0,829	-0,669	-0,902	-0,854	0,813
SIXI	Pearson	-0,810	-0,661	-0,808	-0,891	0,793
RVI	Pearson	0,900	0,634	0,626	0,852	0,753
NDVI	Pearson	0,875	0,634	0,664	0,790	0,741
PRI	Pearson	0,617	0,557	0,868	0,915	0,739
RT	Pearson	-0,879	-0,543	-0,664	-0,769	0,714
ACI	Pearson	-0,863	-0,590	-0,566	-0,775	0,698
SIPI	Pearson	0,857	0,598	0,532	0,752	0,685
NDWI	Pearson	0,713	0,664	0,418	0,742	0,634
WBI	Pearson	0,666	0,629	0,448	0,761	0,626
GP	Pearson	-0,269	-0,447	-0,787	-0,914	0,604
NDII	Pearson	0,512	0,657	0,547	0,672	0,597
CR970	Pearson	0,590	0,590	0,590	0,590	0,590
NDMI	Pearson	0,486	0,657	0,550	0,662	0,589
MSI	Pearson	-0,485	-0,652	-0,562	-0,640	0,585
PSRI	Pearson	-0,672	-0,398	-0,540	-0,720	0,582
DSWI5	Pearson	0,605	0,617	0,299	0,708	0,557
CR1730	Pearson	-0,319	-0,565	-0,755	-0,560	0,549
CAI	Pearson	-0,339	-0,357	-0,720	-0,680	0,524
RVSI	Pearson	-0,849	-0,714	0,057	-0,496	0,500
NPQI	Pearson	0,762	0,092	0,485	0,618	0,489
CR1730filt	Pearson	-0,098	-0,549	-0,748	-0,558	0,488
NDNI	Pearson	0,357	0,669	0,544	0,349	0,480
MCARI	Pearson	-0,172	-0,529	-0,891	-0,283	0,469
EGFN	Pearson	-0,237	0,523	0,817	0,738	0,460
GR1890	Pearson	0,138	-0,587	-0,712	-0,665	0,456
REP (Lin)	Pearson	0,412	0,449	0,484	0,477	0,456
GRatio 1	Pearson	-0,681	-0,614	0,756	-0,742	0,320
LCA	Pearson	0,483	-0,137	-0,761	-0,669	0,271
CR1350	Pearson	0,222	0,234	0,244	0,236	0,234
NDLI	Pearson	0,253	0,528	0,152	-0,022	0,228
GRatio 2	Pearson	-0,491	-0,071	0,129	-0,344	0,194
GR1140	Pearson	0,381	0,179	-0,207	-0,502	0,037

Tabelle Anh. 16: Korrelationskoeffizienten (nach Pflanzenart, Spearman) der Spektralmethoden und des relativen Chlorophyllgehalts (SPAD).

Method	Korrelationskoeffizient	BR	BF	RGG	WFS	MW
GGFN	Spearman	0,854	0,799	0,904	0,948	0,876
Ctr1	Spearman	-0,856	-0,709	-0,947	-0,938	0,863
PSNDc	Spearman	-0,818	-0,686	-0,953	-0,964	0,855
NPCI	Spearman	-0,862	-0,676	-0,964	-0,917	0,855
SRPI	Spearman	0,862	0,676	0,964	0,917	0,855
NDPI	Spearman	-0,852	-0,689	-0,953	-0,917	0,853
mND705	Spearman	0,899	0,637	0,931	0,933	0,850
ARI	Spearman	-0,893	-0,735	-0,901	-0,861	0,847
Ctr2	Spearman	-0,934	-0,643	-0,862	-0,891	0,833
REP (Deriv)	Spearman	0,949	0,628	0,872	0,816	0,816
LCI	Spearman	0,865	0,623	0,856	0,891	0,809
SIXI	Spearman	-0,835	-0,620	-0,819	-0,886	0,790
PRI	Spearman	0,676	0,527	0,858	0,917	0,745
NDVI	Spearman	0,886	0,626	0,591	0,867	0,742
RVI	Spearman	0,886	0,626	0,591	0,867	0,742
ACI	Spearman	-0,888	-0,661	-0,514	-0,814	0,720
RT	Spearman	-0,875	-0,554	-0,543	-0,833	0,701
PSRI	Spearman	-0,816	-0,459	-0,578	-0,871	0,681
SIPI	Spearman	0,845	0,589	0,470	0,758	0,666
NDWI	Spearman	0,722	0,690	0,481	0,764	0,664
WBI	Spearman	0,704	0,646	0,471	0,791	0,653
NDII	Spearman	0,566	0,692	0,531	0,715	0,626
NDMI	Spearman	0,569	0,692	0,531	0,690	0,621
MSI	Spearman	-0,558	-0,698	-0,526	-0,697	0,620
GP	Spearman	-0,311	-0,475	-0,742	-0,905	0,608
CR1725	Spearman	0,026	-0,680	-0,852	-0,876	0,596
CAI	Spearman	-0,423	-0,316	-0,782	-0,840	0,590
DSWI5	Spearman	0,546	0,611	0,368	0,740	0,566
NDNI	Spearman	0,526	0,669	0,597	0,318	0,528
CR970	Spearman	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525
EGFN	Spearman	-0,021	0,597	0,792	0,667	0,509
NPQI	Spearman	0,758	0,123	0,535	0,593	0,502
RVSI	Spearman	-0,791	-0,748	-0,042	-0,426	0,502
GR1890	Spearman	0,108	-0,630	-0,694	-0,739	0,488
MCARI	Spearman	-0,142	-0,516	-0,884	-0,309	0,463
REP (Lin)	Spearman	0,412	0,449	0,484	0,477	0,456
GRatio 1	Spearman	-0,819	-0,651	0,765	-0,760	0,366
LCA	Spearman	0,501	-0,293	-0,703	-0,676	0,293
NDLI	Spearman	0,179	0,609	0,181	0,074	0,261
CR1350	Spearman	0,222	0,234	0,244	0,236	0,234
GRatio 2	Spearman	-0,516	-0,047	0,190	-0,408	0,195
GR1140	Spearman	0,383	0,197	-0,240	-0,485	0,036

Tabelle Anh. 17: Korrelationskoeffizienten der Spektralmethoden (nach Pflanzenart, Pearson) und des Schwermetallgehalts (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn).

Methode	Korrelationskoeffizient	BR					BF					RGG					WFS			MW
		As	Cu	Pb	Cr	Zn	As	Cu	Pb	Ni	Cr	As	Pb	Ni	Cr	Zn	As	Zn	Cd	
RT	Pearson	0,944	0,889	0,648	0,754	0,685	0,564	0,423	0,673	0,531	0,708	0,790	0,687	0,560	0,939	0,541	0,782	0,470	0,562	0,675
NDVI	Pearson	-0,917	-0,760	-0,627	-0,794	-0,692	-0,376	-0,662	-0,723	-0,382	-0,816	-0,771	-0,650	-0,539	-0,937	-0,475	-0,831	-0,508	-0,596	0,670
PSRI	Pearson	0,856	0,731	0,509	0,784	0,681	0,226	0,701	0,656	0,353	0,818	0,784	0,729	0,643	0,653	0,828	0,726	0,569	0,604	0,658
ACI	Pearson	0,921	0,778	0,469	0,793	0,659	0,241	0,715	0,653	0,325	0,815	0,804	0,726	0,550	0,903	0,601	0,746	0,540	0,566	0,656
NDPI	Pearson	0,901	0,736	0,599	0,845	0,596	0,408	0,533	0,802	0,600	0,747	0,748	0,690	0,527	0,891	0,586	0,720	0,400	0,439	0,654
SIPI	Pearson	-0,897	-0,747	-0,633	-0,754	-0,695	-0,358	-0,714	-0,665	-0,243	-0,774	-0,746	-0,620	-0,535	-0,924	-0,423	-0,862	-0,513	-0,620	0,651
Ctr2	Pearson	0,890	0,740	0,588	0,753	0,647	0,413	0,567	0,759	0,503	0,773	0,745	0,623	0,480	0,934	0,429	0,838	0,446	0,542	0,648
CR1725	Pearson	-0,044	-0,151	-0,322	-0,143	0,456	0,237	0,655	0,598	0,474	0,737	0,786	0,741	0,479	0,859	0,629	0,771	0,604	0,797	0,644
NPCI	Pearson	0,886	0,709	0,619	0,840	0,575	0,391	0,515	0,790	0,590	0,745	0,732	0,659	0,481	0,906	0,521	0,726	0,399	0,443	0,640
SRPI	Pearson	-0,885	-0,711	-0,620	-0,832	-0,555	-0,400	-0,534	-0,806	-0,589	-0,733	-0,710	-0,642	-0,458	-0,893	-0,491	-0,734	-0,362	-0,420	0,632
GGFN	Pearson	-0,881	-0,716	-0,579	-0,775	-0,618	-0,430	-0,674	-0,825	-0,487	-0,691	-0,696	-0,620	-0,424	-0,884	-0,419	-0,796	-0,367	-0,427	0,628
DSWI5	Pearson	-0,917	-0,788	-0,484	-0,761	-0,732	-0,276	-0,800	-0,807	-0,289	-0,739	-0,634	-0,507	-0,495	-0,713	-0,261	-0,856	-0,578	-0,655	0,627
MSI	Pearson	0,856	0,761	0,563	0,694	0,700	0,331	0,711	0,833	0,379	0,736	0,578	0,472	0,426	0,745	0,178	0,911	0,601	0,749	0,624
RVI	Pearson	-0,886	-0,729	-0,630	-0,782	-0,613	-0,423	-0,674	-0,756	-0,351	-0,700	-0,677	-0,593	-0,488	-0,852	-0,360	-0,817	-0,371	-0,444	0,619
NDII	Pearson	-0,858	-0,753	-0,549	-0,698	-0,708	-0,346	-0,713	-0,849	-0,385	-0,708	-0,563	-0,454	-0,416	-0,727	-0,154	-0,909	-0,586	-0,717	0,616
NDMI	Pearson	-0,853	-0,755	-0,561	-0,695	-0,695	-0,343	-0,710	-0,845	-0,385	-0,711	-0,564	-0,457	-0,416	-0,728	-0,157	-0,911	-0,589	-0,719	0,616
mND705	Pearson	-0,852	-0,708	-0,585	-0,733	-0,592	-0,440	-0,554	-0,793	-0,518	-0,685	-0,685	-0,587	-0,440	-0,891	-0,363	-0,815	-0,318	-0,405	0,609
LCI	Pearson	-0,812	-0,697	-0,651	-0,711	-0,518	-0,448	-0,561	-0,783	-0,502	-0,697	-0,681	-0,584	-0,449	-0,888	-0,353	-0,832	-0,322	-0,406	0,605
NDWI	Pearson	-0,824	-0,646	-0,456	-0,682	-0,711	-0,350	-0,763	-0,884	-0,289	-0,630	-0,573	-0,472	-0,397	-0,702	-0,156	-0,889	-0,572	-0,701	0,594
PSNDc	Pearson	0,798	0,629	0,612	0,759	0,477	0,436	0,394	0,764	0,651	0,663	0,715	0,644	0,447	0,914	0,484	0,730	0,192	0,279	0,588
RVSI	Pearson	0,845	0,666	0,556	0,747	0,584	0,198	0,674	0,678	0,350	0,790	0,533	0,368	0,191	0,699	0,443	0,706	0,649	0,692	0,576
WBI	Pearson	-0,816	-0,627	-0,521	-0,697	-0,713	-0,353	-0,729	-0,887	-0,203	-0,555	-0,538	-0,414	-0,315	-0,653	-0,085	-0,891	-0,578	-0,706	0,571
PRI	Pearson	-0,735	-0,641	-0,402	-0,595	-0,767	-0,368	-0,486	-0,807	-0,430	-0,631	-0,774	-0,664	-0,459	-0,892	-0,457	-0,626	-0,266	-0,227	0,568
SIXI	Pearson	0,630	0,504	0,644	0,550	0,449	0,479	0,483	0,758	0,497	0,638	0,668	0,554	0,449	0,892	0,324	0,867	0,247	0,390	0,557
GR1890	Pearson	-0,164	0,124	-0,100	-0,284	-0,087	0,678	0,231	0,582	0,494	0,242	0,649	0,572	0,502	0,657	0,426	0,869	0,537	0,748	0,553
Ctr1	Pearson	0,853	0,670	0,615	0,837	0,500	0,414	0,375	0,755	0,647	0,646	0,656	0,572	0,328	0,906	0,373	0,540	0,124	0,104	0,551
GRatio 1	Pearson	0,659	0,460	0,210	0,522	0,670	0,174	0,812	0,778	0,131	0,598	-0,291	-0,356	-0,220	-0,588	-0,090	0,784	0,528	0,669	0,538
ARI	Pearson	0,801	0,639	0,292	0,687	0,593	0,238	0,776	0,707	0,258	0,680	0,630	0,473	0,134	0,681	0,332	0,667	0,569	0,518	0,538
REP (Deriv)	Pearson	-0,790	-0,609	-0,453	-0,656	-0,657	-0,486	-0,605	-0,805	-0,321	-0,456	-0,542	-0,457	-0,292	-0,662	-0,147				0,529
NDNI	Pearson	-0,768	-0,571	-0,715	-0,785	-0,452	0,108	-0,640	-0,319	0,021	-0,580	-0,660	-0,494	-0,245	-0,828	-0,312	-0,732	-0,652	-0,632	0,514
GRatio 2	Pearson	0,604	0,463	0,145	0,389	0,639	0,185	0,487	0,680	0,461	0,682	0,513	0,369	0,393	0,752	0,097	0,826	0,508	0,568	0,487
NDLI	Pearson	-0,827	-0,667	-0,718	-0,813	-0,476	0,261	-0,531	-0,154	0,285	-0,350	-0,313	-0,147	-0,023	-0,577	0,000	-0,508	-0,515	-0,427	0,361
GP	Pearson	-0,260	-0,098	0,046	-0,336	-0,138	0,617	0,022	0,541	0,592	0,284	0,671	0,567	0,448	0,892	0,374	0,752	0,003	0,186	0,287
NPQI	Pearson	-0,712	-0,521	-0,808	-0,771	-0,335	0,344	0,114	0,205	-0,029	-0,338	-0,201	-0,112	-0,004	-0,560	0,108	-0,252	-0,123	-0,192	0,233
GR1140	Pearson	-0,688	-0,443	-0,582	-0,724	-0,418	0,300	-0,529	-0,127	0,236	-0,381	-0,270	-0,057	0,045	-0,536	0,122	0,391	0,117	0,313	0,179
EGFN	Pearson	0,432	0,397	-0,242	0,278	0,263	-0,470	-0,014	-0,424	-0,207	0,073	-0,502	-0,422	-0,353	-0,691	-0,134	-0,667	0,135	-0,020	0,143
LCA	Pearson	-0,667	-0,419	-0,463	-0,681	-0,428	0,529	-0,156	0,372	0,458	-0,026	0,434	0,440	0,404	0,460	0,242	0,796	0,408	0,607	0,128
CAI	Pearson	-0,412	-0,521	0,127	-0,062	-0,493	0,235	0,114	0,030	-0,134	-0,544	0,460	0,493	-0,036	0,485	0,353	0,744	0,441	0,781	0,114
MCARI	Pearson	-0,590	-0,397	-0,349	-0,599	-0,456	0,566	0,125	0,628	0,645	0,312	0,416	0,419	0,226	0,726	0,168	-0,463	-0,787	-0,761	0,010

Tabelle Anh. 18: Korrelationskoeffizienten der Spektralmethoden (nach Pflanzenart, Pearson) und des Schwermetallgehalts (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn).

Methode	Korrelationskoeffizient	BR					BF					RGG					WFS			MW
		As	Cu	Pb	Cr	Zn	As	Cu	Pb	Ni	Cr	As	Pb	Ni	Cr	Zn	As	Zn	Cd	
DSWI5	Spearman	-0,921	-0,850	-0,767	-0,833	-0,750	-0,427	-0,608	-0,797	-0,399	-0,684	-0,745	-0,768	-0,536	-0,675	-0,263	-0,821	-0,657	-0,609	0,673
NDVI	Spearman	-0,937	-0,883	-0,833	-0,867	-0,767	-0,371	-0,713	-0,650	-0,378	-0,740	-0,697	-0,747	-0,634	-0,863	-0,165	-0,790	-0,524	-0,469	0,668
RVI	Spearman	-0,937	-0,883	-0,833	-0,867	-0,767	-0,371	-0,713	-0,650	-0,378	-0,740	-0,697	-0,747	-0,634	-0,863	-0,165	-0,790	-0,524	-0,469	0,668
RT	Spearman	0,921	0,867	0,833	0,817	0,750	0,524	0,406	0,713	0,601	0,632	0,661	0,690	0,690	0,839	0,235	0,742	0,497	0,455	0,660
SIPI	Spearman	-0,879	-0,800	-0,783	-0,817	-0,817	-0,427	-0,748	-0,650	-0,322	-0,702	-0,685	-0,704	-0,627	-0,851	-0,095	-0,845	-0,566	-0,522	0,658
MSI	Spearman	0,879	0,833	0,767	0,733	0,767	0,406	0,587	0,804	0,476	0,761	0,661	0,655	0,539	0,723	0,042	0,845	0,622	0,550	0,647
NDPI	Spearman	0,862	0,800	0,750	0,817	0,583	0,427	0,434	0,783	0,622	0,730	0,673	0,725	0,564	0,839	0,196	0,766	0,552	0,487	0,645
NDII	Spearman	-0,879	-0,833	-0,767	-0,733	-0,767	-0,364	-0,601	-0,783	-0,413	-0,733	-0,661	-0,655	-0,539	-0,723	-0,042	-0,845	-0,622	-0,550	0,639
NDMI	Spearman	-0,879	-0,833	-0,767	-0,733	-0,767	-0,364	-0,601	-0,783	-0,413	-0,733	-0,661	-0,655	-0,539	-0,723	-0,042	-0,845	-0,622	-0,550	0,639
NPCI	Spearman	0,862	0,800	0,750	0,817	0,583	0,385	0,469	0,776	0,573	0,740	0,648	0,718	0,522	0,851	0,147	0,766	0,552	0,487	0,636
SRPI	Spearman	-0,862	-0,800	-0,750	-0,817	-0,583	-0,385	-0,469	-0,776	-0,573	-0,740	-0,648	-0,718	-0,522	-0,851	-0,147	-0,766	-0,552	-0,487	0,636
NDWI	Spearman	-0,895	-0,817	-0,700	-0,783	-0,783	-0,238	-0,580	-0,811	-0,336	-0,674	-0,685	-0,697	-0,543	-0,742	-0,084	-0,845	-0,643	-0,574	0,635
PSRI	Spearman	0,904	0,867	0,783	0,800	0,683	0,622	0,538	0,818	0,685	0,607	0,503	0,430	0,336	0,565	0,445	0,766	0,552	0,487	0,633
GGFN	Spearman	-0,895	-0,817	-0,700	-0,783	-0,783	-0,315	-0,594	-0,685	-0,524	-0,821	-0,612	-0,690	-0,494	-0,875	-0,063	-0,717	-0,483	-0,368	0,623
Ctr2	Spearman	0,854	0,783	0,683	0,717	0,817	0,399	0,483	0,713	0,594	0,772	0,612	0,676	0,501	0,875	-0,004	0,772	0,490	0,413	0,619
GRatio 1	Spearman	0,803	0,733	0,667	0,75	0,567	0,308	0,72	0,832	0,147	0,554	-0,27	-0,42	-0,38	-0,5	0,196	0,754	0,601	0,588	0,617
ACI	Spearman	0,803	0,700	0,600	0,750	0,567	0,413	0,755	0,685	0,343	0,684	0,673	0,711	0,550	0,851	0,123	0,729	0,587	0,543	0,615
REP (Deriv)	Spearman	-0,803	-0,682	-0,577	-0,691	-0,717	-0,332	-0,536	-0,709	-0,536	-0,814	-0,624	-0,728	-0,570	-0,788	-0,102				0,614
mND705	Spearman	-0,879	-0,833	-0,767	-0,733	-0,767	-0,399	-0,483	-0,713	-0,594	-0,772	-0,564	-0,669	-0,529	-0,851	0,039	-0,742	-0,427	-0,343	0,613
CR1725	Spearman	-0,151	-0,176	-0,418	-0,201	0,351	0,490	0,671	0,678	0,608	0,789	0,588	0,613	0,392	0,754	0,046	0,766	0,706	0,637	0,595
LCI	Spearman	-0,778	-0,767	-0,867	-0,700	-0,483	-0,364	-0,517	-0,671	-0,573	-0,821	-0,588	-0,683	-0,571	-0,851	0,039	-0,742	-0,427	-0,343	0,595
PSNDc	Spearman	0,711	0,600	0,650	0,717	0,500	0,427	0,434	0,783	0,622	0,730	0,709	0,754	0,581	0,894	0,151	0,717	0,385	0,294	0,592
PRI	Spearman	-0,820	-0,783	-0,550	-0,633	-0,833	-0,434	-0,455	-0,909	-0,469	-0,642	-0,721	-0,754	-0,599	-0,875	-0,109	-0,547	-0,315	-0,189	0,591
WBI	Spearman	-0,837	-0,800	-0,700	-0,683	-0,750	-0,280	-0,538	-0,853	-0,259	-0,561	-0,673	-0,585	-0,242	-0,669	-0,011	-0,845	-0,615	-0,560	0,581
NDNI	Spearman	-0,661	-0,600	-0,800	-0,767	-0,433	-0,238	-0,748	-0,524	-0,042	-0,635	-0,770	-0,747	-0,455	-0,869	-0,105	-0,632	-0,650	-0,553	0,568
ARI	Spearman	0,803	0,700	0,600	0,750	0,567	0,336	0,699	0,692	0,427	0,758	0,624	0,592	0,112	0,565	0,042	0,681	0,671	0,564	0,566
SIXI	Spearman	0,603	0,567	0,767	0,583	0,400	0,371	0,469	0,671	0,580	0,754	0,648	0,690	0,613	0,839	0,039	0,821	0,350	0,308	0,560
RVSI	Spearman	0,854	0,750	0,667	0,800	0,683	0,154	0,594	0,594	0,294	0,828	0,406	0,317	0,186	0,717	0,137	0,638	0,650	0,630	0,550
GR1890	Spearman	-0,08	0,05	-0,18	-0,33	0,117	0,545	0,21	0,545	0,601	0,33	0,733	0,655	0,564	0,505	0,326	0,875	0,531	0,529	0,535
Ctr1	Spearman	0,770	0,650	0,717	0,850	0,500	0,427	0,434	0,783	0,622	0,730	0,491	0,577	0,396	0,875	-0,095	0,426	0,301	0,102	0,531
GRatio 2	Spearman	0,619	0,517	0,35	0,433	0,583	0,28	0,259	0,692	0,497	0,604	0,636	0,669	0,48	0,717	0,014	0,821	0,594	0,564	0,518
NDLI	Spearman	-0,661	-0,600	-0,800	-0,767	-0,433	-0,126	-0,741	-0,434	0,280	-0,361	-0,370	-0,373	0,007	-0,480	0,081	-0,602	-0,608	-0,585	0,421
GP	Spearman	-0,100	-0,067	0,100	-0,133	-0,067	0,490	0,049	0,538	0,566	0,330	0,576	0,570	0,609	0,809	0,060	0,675	0,028	0,042	0,282
GR1140	Spearman	-0,63	-0,53	-0,67	-0,73	-0,37	-0,14	-0,76	-0,44	0,245	-0,38	-0,43	-0,43	0,004	-0,47	0,168	0,359	0,042	0,112	0,281
EGFN	Spearman	0,134	0,067	-0,233	0,067	0,067	-0,308	-0,119	-0,364	-0,280	-0,042	-0,451	-0,521	-0,442	-0,614	0,098	-0,644	0,056	-0,074	0,200
NPQI	Spearman	-0,628	-0,583	-0,850	-0,733	-0,383	0,364	0,119	0,168	0,014	-0,382	0,079	-0,056	0,056	-0,547	0,574	-0,036	0,000	0,105	0,151
LCA	Spearman	-0,561	-0,450	-0,583	-0,283	0,490	-0,077	0,531	0,671	0,326	0,261	0,289	0,476	0,371	0,056	0,766	0,427	0,403	0,136	
CAI	Spearman	-0,360	-0,350	0,000	0,000	-0,400	0,063	0,189	-0,119	-0,224	-0,404	0,200	0,310	-0,130	0,274	-0,053	0,657	0,566	0,511	0,041
MCARI	Spearman	-0,552	-0,500	-0,467	-0,600	-0,333	0,504	0,105	0,545	0,629	0,330	0,333	0,451	0,480	0,681	-0,130	-0,304	-0,685	-0,683	0,011

Tabelle Anh. 19: Mittlerer Korrelationskoeffizient (Pearson) der Spektralmethoden und der Schwermetallgehalte (Cr, Cu, Hg, Ni) der Messpunkte von 2009 der Brennnessel- und Rohrglanzgraspflanzen.

Methode	Korrelationskoeffizient	BR			RGG			MW
		Cr	Cu	Hg	Cr	Cu	Ni	
GRatio 1	Pearson	0,313	0,532	0,628	0,483	0,687	0,192	0,472
CR1725	Pearson	0,205	0,736	0,762	0,221	0,509	0,301	0,456
ARI	Pearson	0,245	0,321	0,625	0,759	0,286	0,119	0,393
NDPI	Pearson	0,019	0,491	0,648	0,715	0,260	0,137	0,378
PSRI	Pearson	-0,113	0,675	0,474	0,755	0,201	0,185	0,363
DSWI5	Pearson	0,083	-0,650	-0,336	-0,329	-0,692	-0,227	0,358
NPCI	Pearson	-0,040	0,444	0,637	0,717	0,274	0,101	0,356
SRPI	Pearson	0,044	-0,395	-0,631	-0,702	-0,298	-0,088	0,345
NDNI	Pearson	-0,073	-0,665	-0,292	-0,757	-0,097	-0,144	0,338
PSNDc	Pearson	0,212	0,317	0,733	0,545	0,102	0,098	0,335
NDII	Pearson	0,058	-0,673	-0,271	-0,096	-0,762	-0,081	0,304
ACI	Pearson	-0,347	0,439	0,544	0,679	0,185	0,312	0,302
MSI	Pearson	-0,104	0,678	0,286	0,084	0,755	0,108	0,301
GR1140	Pearson	-0,491	-0,623	0,057	-0,628	0,026	-0,142	0,300
NDMI	Pearson	0,071	-0,672	-0,280	-0,082	-0,767	-0,067	0,299
GGFN	Pearson	0,119	-0,168	-0,721	-0,598	-0,040	-0,336	0,291
GP	Pearson	-0,571	-0,250	0,025	-0,661	-0,479	0,204	0,289
RVSI	Pearson	0,201	0,273	0,202	0,851	0,045	0,157	0,288
PRI	Pearson	-0,059	-0,512	-0,553	-0,640	0,001	0,042	0,287
GRatio 2	Pearson	0,192	0,693	0,301	-0,342	0,561	0,307	0,285
MCARI	Pearson	-0,043	-0,237	-0,019	-0,619	-0,336	-0,393	0,274
NPQI	Pearson	0,787	0,647	-0,140	-0,209	-0,198	0,749	0,273
Ctr2	Pearson	-0,270	0,440	0,473	0,611	0,037	0,297	0,265
NDWI	Pearson	-0,017	-0,608	-0,407	-0,033	-0,813	0,383	0,249
NDVI	Pearson	0,443	-0,466	-0,378	-0,638	-0,110	-0,332	0,247
mND705	Pearson	0,120	-0,405	-0,453	-0,516	-0,062	-0,147	0,244
Ctr1	Pearson	0,242	0,219	0,706	0,465	0,088	-0,400	0,220
WBI	Pearson	-0,043	-0,571	-0,298	0,078	-0,790	0,316	0,218
SIPi	Pearson	0,548	-0,415	-0,274	-0,576	-0,082	-0,390	0,198
LCI	Pearson	0,284	-0,378	-0,318	-0,477	-0,049	-0,246	0,198
RVI	Pearson	0,543	-0,283	-0,414	-0,477	-0,120	-0,412	0,194
NDLI	Pearson	-0,207	-0,641	0,622	-0,743	-0,016	-0,114	0,183
LCA	Pearson	-0,324	0,002	-0,144	-0,727	0,214	0,078	0,150
SIXI	Pearson	-0,367	0,322	0,306	0,425	-0,109	0,318	0,149
GR1890	Pearson	0,040	-0,210	-0,446	0,584	-0,274	-0,341	0,108
CAI	Pearson	0,245	0,310	-0,923	0,621	0,220	0,041	0,086
REP (Deriv)	Pearson	-0,039	-0,080	-0,514	0,180	-0,533	0,615	0,062
RT	Pearson	-0,864	0,046	0,294	0,319	-0,019	0,567	0,057
EGFN	Pearson	0,214	-0,323	-0,014	-0,253	0,328	0,071	0,004

Tabelle Anh. 20: Mittlerer Korrelationskoeffizient (Spearman) der Spektralmethoden und der Schwermetallgehalte (Cr, Cu, Hg, Ni) der Messpunkte von 2009 der Brennessel- und Rohrglanzgraspflanzen.

Methode	Korrelationskoeffizient	BR			RGG			MW
		Cr	Cu	Hg	Cr	Cu	Ni	
CR1725	Spearman	0,429	0,600	0,543	0,567	0,452	0,286	0,479
GRatio 1	Spearman	0,000	0,257	0,600	0,650	0,762	0,107	0,396
RVSI	Spearman	0,321	0,486	0,143	0,633	0,310	0,393	0,381
NDNI	Spearman	0,000	-0,257	-0,543	-0,617	-0,310	-0,179	0,317
MCARI	Spearman	-0,036	-0,429	0,200	-0,733	-0,548	-0,214	0,293
ARI	Spearman	-0,036	0,257	0,600	0,667	0,452	-0,321	0,270
GP	Spearman	-0,607	-0,143	0,143	-0,583	-0,429	0,000	0,270
NDPI	Spearman	-0,214	0,371	0,657	0,351	0,216	0,214	0,266
DSWI5	Spearman	0,286	-0,429	-0,257	-0,433	-0,619	-0,107	0,260
NPCI	Spearman	-0,214	0,371	0,638	0,383	0,286	0,036	0,250
SRPI	Spearman	0,214	-0,371	-0,600	-0,383	-0,286	-0,036	0,244
PSRI	Spearman	-0,357	0,429	0,371	0,450	0,071	0,393	0,226
NDWI	Spearman	0,214	-0,429	-0,371	-0,233	-0,762	0,250	0,222
MSI	Spearman	-0,286	0,429	0,257	0,167	0,571	0,143	0,213
NPQI	Spearman	0,643	0,257	0,058	-0,083	-0,048	0,429	0,209
NDII	Spearman	0,286	-0,429	-0,143	-0,201	-0,599	-0,143	0,205
PRI	Spearman	0,071	-0,371	-0,600	-0,268	-0,024	-0,018	0,202
GGFN	Spearman	0,214	-0,371	-0,657	-0,050	0,167	-0,500	0,200
PSNDc	Spearman	-0,036	0,257	0,600	0,083	0,190	0,071	0,194
ACI	Spearman	-0,607	0,257	0,543	0,500	0,214	0,250	0,193
WBI	Spearman	0,214	-0,429	-0,371	-0,067	-0,771	0,273	0,192
NDMI	Spearman	0,286	-0,429	-0,203	-0,133	-0,619	0,000	0,183
Ctr1	Spearman	0,214	0,029	0,543	0,183	0,143	-0,179	0,156
GRatio 2	Spearman	0,036	0,486	0,486	-0,317	0,238	0,000	0,155
SIPI	Spearman	0,679	-0,543	-0,257	-0,444	-0,119	-0,126	0,135
Ctr2	Spearman	-0,357	0,429	0,429	0,183	-0,071	0,143	0,126
NDLI	Spearman	-0,071	-0,486	0,429	-0,450	-0,119	-0,036	0,122
mND705	Spearman	0,214	-0,429	-0,371	-0,100	0,000	-0,036	0,120
GR1140	Spearman	-0,321	-0,200	0,029	-0,100	0,095	-0,214	0,119
NDVI	Spearman	0,643	-0,371	-0,257	-0,444	-0,119	-0,126	0,112
RVI	Spearman	0,643	-0,371	-0,257	-0,467	-0,119	-0,071	0,107
LCI	Spearman	0,357	-0,314	-0,257	-0,183	0,071	-0,143	0,078
LCA	Spearman	-0,536	-0,029	-0,143	-0,367	0,167	0,464	0,074
GR1890	Spearman	-0,107	-0,029	-0,543	0,283	0,024	0,000	0,062
REP (Deriv)	Spearman	0,120	-0,068	-0,370	0,193	-0,230	0,670	0,052
EGFN	Spearman	0,143	-0,314	0,086	0,033	0,357	0,000	0,051
CAI	Spearman	0,250	0,371	-0,943	0,350	0,095	0,107	0,038
SIXI	Spearman	-0,571	0,257	0,200	0,050	-0,286	0,214	0,023
RT	Spearman	-0,821	0,314	0,257	0,233	-0,143	0,143	0,003

Tabelle Anh. 21: Korrelationskoeffizienten der Spektralmethoden (nach Pflanzenart, Pearson) und des Nährstoffgehalts (P, K) der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

Methode	Korrelationskoeffizient	BR		BF		RGG		WFS		MW
		P	K	P	K	P	K	P	K	
REP (Deriv)	Pearson	0,426	0,818	0,880	0,954	0,304	0,922			0,717
SIXI	Pearson	-0,741	-0,796	-0,779	-0,889	-0,002	-0,876	-0,417	-0,777	0,660
LCI	Pearson	0,545	0,808	0,727	0,904	0,024	0,888	0,307	0,764	0,621
RVI	Pearson	0,425	0,842	0,746	0,916	0,028	0,908	0,314	0,730	0,614
mND705	Pearson	0,464	0,837	0,711	0,899	0,012	0,893	0,270	0,745	0,604
GGFN	Pearson	0,386	0,840	0,702	0,925	-0,015	0,893	0,210	0,714	0,582
CR970	Pearson	0,333	0,660	0,670	0,555	0,314	0,796	0,300	0,770	0,550
PSNDc	Pearson	-0,519	-0,892	-0,610	-0,772	0,159	-0,804	-0,200	-0,760	0,550
WBI	Pearson	0,357	0,769	0,701	0,806	0,323	0,744	0,197	0,440	0,542
Ctr1	Pearson	-0,375	-0,863	-0,563	-0,755	0,013	-0,854	-0,105	-0,793	0,537
NDWI	Pearson	0,311	0,763	0,689	0,859	0,260	0,775	0,171	0,414	0,530
Ctr2	Pearson	-0,402	-0,824	-0,654	-0,850	0,064	-0,843	-0,131	-0,577	0,527
SIPI	Pearson	0,407	0,790	0,669	0,840	-0,063	0,848	0,117	0,493	0,513
EGFN	Pearson	0,600	-0,140	0,803	0,588	0,145	0,818	0,610	0,658	0,510
SRPI	Pearson	0,335	0,848	0,547	0,779	-0,127	0,854	0,145	0,659	0,505
NDLI	Pearson	0,499	0,879	0,249	0,392	0,190	0,656	0,720	0,426	0,501
NDMI	Pearson	0,388	0,664	0,583	0,806	0,159	0,778	0,211	0,413	0,500
NDII	Pearson	0,373	0,673	0,587	0,808	0,161	0,776	0,208	0,413	0,500
NDNI	Pearson	0,562	0,917	0,300	0,517	0,031	0,756	0,453	0,357	0,487
MSI	Pearson	-0,383	-0,659	-0,556	-0,791	-0,132	-0,776	-0,190	-0,364	0,481
NDVI	Pearson	0,345	0,782	0,622	0,828	-0,113	0,827	0,066	0,489	0,481
NPCI	Pearson	-0,311	-0,823	-0,521	-0,756	0,156	-0,830	-0,077	-0,611	0,472
NDPI	Pearson	-0,250	-0,778	-0,535	-0,771	0,210	-0,788	-0,073	-0,612	0,449
ARI	Pearson	0,032	-0,642	-0,533	-0,844	-0,147	-0,721	-0,109	-0,583	0,443
DSWI5	Pearson	0,151	0,661	0,489	0,745	0,100	0,708	0,134	0,447	0,429
PRI	Pearson	0,063	0,368	0,530	0,736	-0,050	0,835	0,079	0,779	0,418
GRatio 2	Pearson	-0,398	-0,660	-0,216	-0,428	-0,088	-0,757	-0,285	-0,502	0,417
GR1140	Pearson	0,504	0,940	0,169	0,318	0,325	0,533	0,417	0,076	0,410
RT	Pearson	-0,268	-0,604	-0,599	-0,735	0,187	-0,745	0,062	-0,403	0,388
ACI	Pearson	-0,066	-0,687	-0,400	-0,702	0,164	-0,785	0,045	-0,450	0,360
GP	Pearson	-0,339	0,265	-0,594	-0,564	0,097	-0,751	-0,183	-0,675	0,343
RVSI	Pearson	-0,419	-0,878	-0,560	-0,796	0,379	-0,203	0,036	-0,254	0,337
MCARI	Pearson	-0,064	0,493	-0,621	-0,659	-0,128	-0,767	-0,275	-0,211	0,279
CAI	Pearson	0,001	0,046	-0,441	-0,236	-0,364	-0,331	-0,261	-0,060	0,206
PSRI	Pearson	0,034	-0,473	-0,231	-0,580	0,439	-0,422	0,129	-0,335	0,180
NPQI	Pearson	0,551	0,853	-0,283	-0,083	0,212	0,543	-0,369	-0,065	0,170
GRatio 1	Pearson	-0,081	-0,614	-0,537	-0,730	0,214	0,761	0,010	-0,271	0,156
CR1725	Pearson	0,334	0,226	-0,314	-0,716	0,299	-0,650	-0,018	-0,100	0,118
GR1890	Pearson	0,275	0,669	-0,439	-0,467	0,247	-0,529	-0,065	-0,210	0,065
LCA	Pearson	0,357	0,887	-0,175	-0,141	0,060	-0,455	0,074	-0,213	0,049

Tabelle Anh. 22: Korrelationskoeffizienten der Spektralmethoden (nach Pflanzenart, Spearman) und des Nährstoffgehalts (P, K) der Gefäßversuchsreihe 2007 im Jahr 2008.

Methode	Korrelationskoeffizient	BR		BF		RGG		WFS		MW
		P	K	P	K	P	K	P	K	
NDLI	Spearman	0,600	0,817	0,462	0,601	0,070	0,441	0,769	0,427	0,523
REP (Deriv)	Spearman	0,324	0,638	0,529	0,843	-0,053	0,833			0,519
NDNI	Spearman	0,600	0,817	0,497	0,783	-0,028	0,678	0,497	0,287	0,516
SIXI	Spearman	-0,800	-0,700	-0,538	-0,804	0,154	-0,811	-0,028	-0,524	0,507
LCI	Spearman	0,567	0,533	0,524	0,867	-0,063	0,818	0,007	0,510	0,471
Ctr1	Spearman	-0,383	-0,717	-0,566	-0,797	0,063	-0,846	0,133	-0,650	0,471
GR1140	Spearman	0,450	0,850	0,469	0,524	0,336	0,476	0,455	0,168	0,466
PSNDc	Spearman	-0,500	-0,717	-0,566	-0,797	0,189	-0,825	0,063	-0,538	0,462
ARI	Spearman	-0,100	-0,600	-0,538	-0,923	-0,231	-0,587	-0,098	-0,517	0,449
mND705	Spearman	0,350	0,500	0,531	0,825	-0,049	0,839	0,007	0,510	0,439
SIPI	Spearman	0,350	0,500	0,657	0,867	-0,182	0,804	0,091	0,406	0,437
Ctr2	Spearman	-0,300	-0,550	-0,531	-0,825	0,126	-0,853	-0,042	-0,469	0,431
GGFN	Spearman	0,200	0,533	0,434	0,902	-0,084	0,811	-0,028	0,538	0,413
NPCI	Spearman	-0,200	-0,617	-0,545	-0,811	0,189	-0,825	-0,035	-0,441	0,411
SRPI	Spearman	0,200	0,617	0,545	0,811	-0,189	0,825	0,035	0,441	0,411
NDVI	Spearman	0,233	0,500	0,622	0,867	-0,196	0,776	0,049	0,413	0,408
RVI	Spearman	0,233	0,500	0,622	0,867	-0,196	0,776	0,049	0,413	0,408
NDPI	Spearman	-0,200	-0,617	-0,566	-0,797	0,210	-0,811	-0,035	-0,441	0,407
ACI	Spearman	-0,100	-0,600	-0,622	-0,874	0,210	-0,790	-0,014	-0,420	0,401
EGFN	Spearman	0,633	0,083	0,517	0,203	0,021	0,683	0,664	0,315	0,390
MSI	Spearman	-0,350	-0,500	-0,510	-0,790	0,091	-0,552	-0,035	-0,322	0,371
WBI	Spearman	0,267	0,583	0,524	0,615	0,154	0,301	0,112	0,399	0,369
NDII	Spearman	0,350	0,500	0,504	0,748	-0,091	0,552	0,035	0,322	0,365
NDMI	Spearman	0,350	0,500	0,504	0,748	-0,091	0,552	0,035	0,322	0,365
RT	Spearman	-0,317	-0,417	-0,517	-0,762	0,266	-0,741	0,028	-0,427	0,361
NDWI	Spearman	0,200	0,533	0,504	0,706	-0,035	0,469	0,084	0,357	0,352
DSWI5	Spearman	0,217	0,517	0,552	0,727	-0,126	0,490	0,077	0,343	0,350
PRI	Spearman	-0,050	0,183	0,573	0,734	-0,168	0,818	-0,091	0,685	0,336
GRatio 2	Spearman	-0,300	-0,600	-0,273	-0,399	0,098	-0,608	-0,175	-0,266	0,315
GP	Spearman	-0,517	0,033	-0,545	-0,420	0,245	-0,748	-0,021	-0,497	0,309
PSRI	Spearman	-0,183	-0,550	-0,504	-0,741	0,545	-0,524	-0,035	-0,441	0,304
CR970	Spearman	0,199	0,122	0,400	0,444	0,280	0,434	0,222	0,222	0,290
RVSI	Spearman	-0,217	-0,600	-0,573	-0,783	0,238	-0,266	0,084	-0,126	0,280
MCARI	Spearman	-0,083	0,467	-0,517	-0,448	-0,035	-0,664	-0,329	-0,336	0,243
GRatio 1	Spearman	-0,167	-0,650	-0,629	-0,699	0,105	0,692	0,021	-0,252	0,197
NPQI	Spearman	0,683	0,733	-0,161	0,182	0,133	0,469	-0,441	-0,182	0,177
CAI	Spearman	-0,117	-0,167	-0,259	0,063	-0,510	-0,147	-0,168	-0,049	0,169
CR1725	Spearman	0,569	0,485	-0,469	-0,930	0,203	-0,706	-0,028	-0,252	0,141
GR1890	Spearman	0,367	0,750	-0,399	-0,504	0,196	-0,469	-0,021	-0,294	0,047
LCA	Spearman	0,483	0,900	-0,378	-0,336	0,182	-0,364	0,126	-0,245	0,046

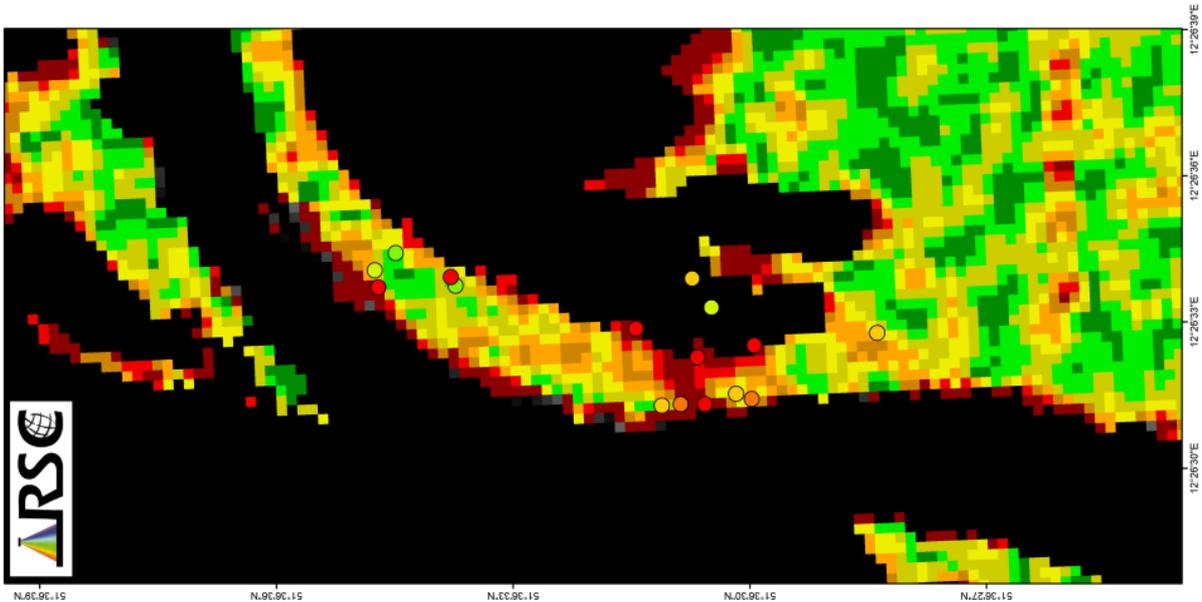
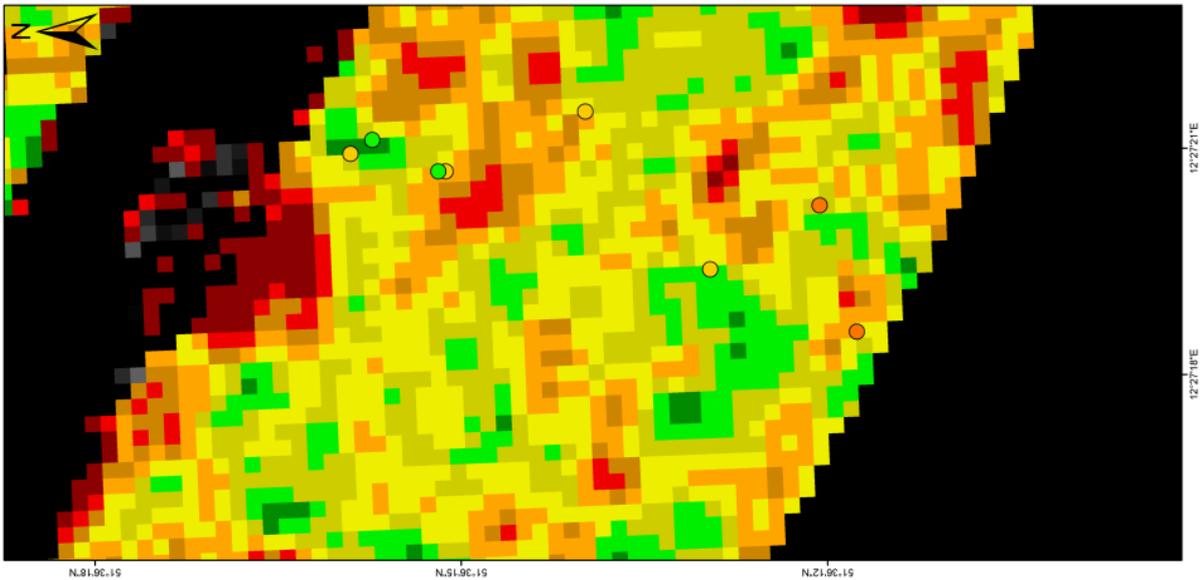
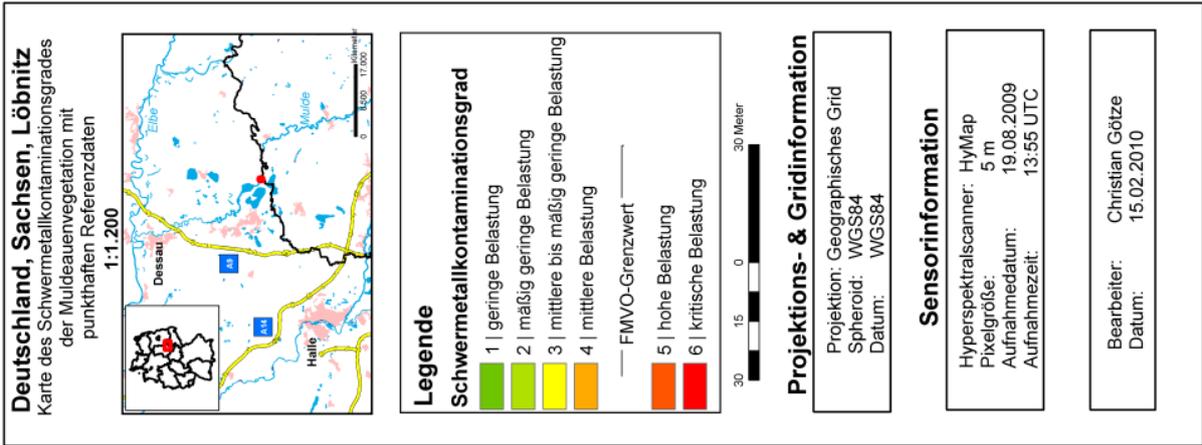


Abbildung Anh. 50: Karte des Schwermetallkontaminationsgrades (Methode CR1725) der Muldeauenv egetation mit punkthaften Analysedaten bei Lößnitz.

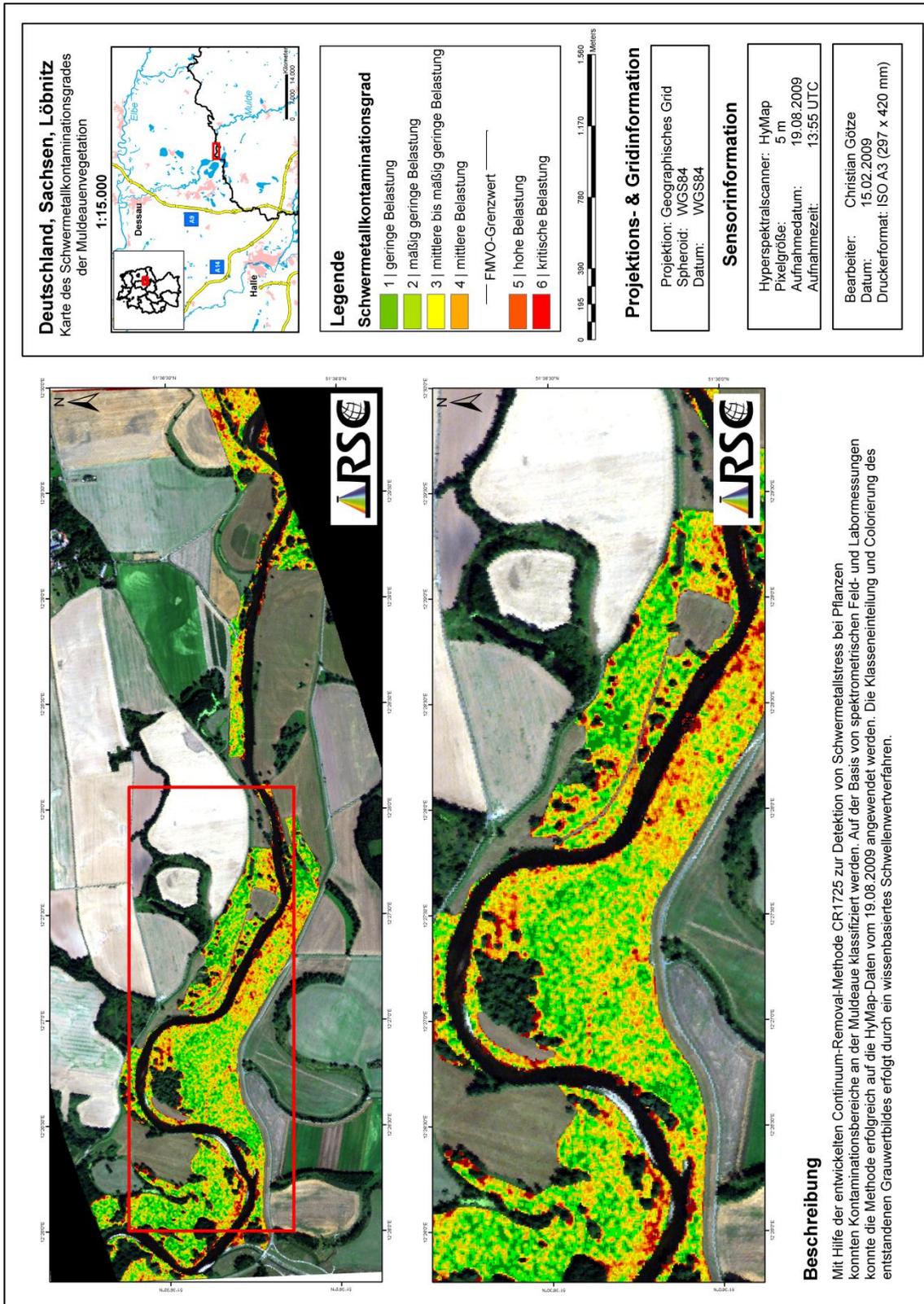


Abbildung Anh. 51: Karte des Schwermetallkontaminationsgrades (Methode CR1725) der Muldeauenvegetation bei Löbnitz.

CHRISTIAN GÖTZE | CURRICULUM VITAE

KONTAKT

Name Christian Götze
Adresse Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg,
Institut für Geowissenschaften,
Fachbereich Geofernerkundung und Kartographie,
Von-Seckendorff-Platz 4, D-06108 Halle (Saale)
Tel. (Büro) +49 (0) 345 5526021
Tel. (Handy) +41 (0) 170 2065249
Email christian.goetze@geo.uni-halle.de
Website <http://www.geo.uni-halle.de/geofern/mitglieder/goetze/>

BERUFSERFAHRUNGEN

seit 09/2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachbereich Geofernerkundung (*Prof. Dr.Cornelia Gläßer*)
07/2009 – 09/2010 Projektmitarbeiter, Projekt: „*EnMAP-Nutzungsvorbereitung – Unterstützung der Hochschulforschung mit HyMap-Hyperspektraldaten*“
06/2009 – 09/2010 Projektmitarbeiter, Projekt: „*RapidEye Science Archive – RESA*“
07/2006 – 01/2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachbereich Geofernerkundung (*Prof. Dr.Cornelia Gläßer*)

BILDUNG

01/2007 – 06/2010 Doktorand, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachbereich Geofernerkundung, Thema: „*Detektion von Schwermetallkontaminationen in den Elb- und Muldeauen mittels Parametrisierung des spektralen Verhaltens der Vegetation*“
01/2006 **Dipl.-Geograph** (MSc.), Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachbereich Geofernerkundung, Thema: „*Identifikation von Vegetationsschädigungen in der Tagebaufolgelandschaft Goitsche durch Ableitung von Vegetationsindizes aus hyperspektralen HyMap-Daten*“
10/1999 – 01/2006 Geographiestudent, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften
06/1998 **Abitur**, Bettina-von-Arnim-Gymnasium, Magdeburg

WISSENSINTENSIVE DIENSTLEISTUNGEN

- Feldarbeit Mitarbeit in dem Projekt „*Assessment of Mining Related Impacts Based on Utilization of (ARES) Airborne Hyperspectral Sensor*“ (2010): Kartierung, Feldspektrometrie, Probenahme und Bestimmung pflanzenphysiologischer Parameter, Sokolov, Litov
- Mitarbeit in der „*White Reference Tour 2009*“ der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (*Dr. András Jung*) (2009): Spektralanalyse und digitale Bildverarbeitung
- HyEurope 2009 Kampagne (2009): Feldspektrometrie, Probenahme und Bestimmung pflanzenphysiologischer Parameter, Petersroda, Löbnitz, Laue
- HyEurope 2008 Kampagne (2008): Feldspektrometrie, Probenahme und Bestimmung pflanzenphysiologischer Parameter, Petersroda, Löbnitz
- Feldkampagne für das Projekt „*Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamarasysteme*“ (2008): spektrometrische Referenzmessungen, Vahingen (Enz)
- CHRIS-Proba Projekt 4613 (2007): Feldspektrometrie, Probenahme und Bestimmung pflanzenphysiologischer Parameter, Petersroda

STIPENDIEN

- 01/2007 - 12/2009 Promotionsstipendium gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (AZ 20006/859)

LEHRE

- WS 2010/2011 Satellitenfernerkundung zur Lagerstättenexploration
 WS 2010/2011 Spektrale Explorationsmethoden
 WS 2010/2011 Geodatenanalyse
 SS 2009 Einführung in die digitale Bildverarbeitung
 SS 2008 Einführung in die digitale Bildverarbeitung

WEITERE INFORMATIONEN

- IT-Kenntnisse Anwendungen: ENVI, Erdas Imagine, eCognition, ArcView
 Sprachen Deutsch, Englisch
 Feldgeräte ASD Field Spec Pro, GER IRIS Mark V, AvaSpec-3648, LiCor LAI 2000, Minolta SPAD, PAM 2000

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, daß ich die beiliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

A handwritten signature in black ink, reading "Christian Götze". The signature is written in a cursive style with a large initial 'C' and 'G'.

Halle, den 30.08.2010

Christian Götze