

# Wasser- und Stoffhaushalt der wägbaren Lysimeterstation Colbitz

Ein Referenzstandort zur Umsetzung der  
Erfordernisse der EU-WRRL



<b>Auftraggeber:</b>	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Willi-Brundert-Straße 14 06132 Halle (Saale)
<b>Auftragnehmer und Bearbeiter:</b>	Dr. agr. Jens Hagenau Eichendorffstraße 9 06114 Halle (Saale)
<b>Vertragsnummer:</b>	13/S/430/HAL
<b>Abgabe:</b>	Halle, 16.09.2014
<b>Bestätigt:</b>	Jens Hagenau

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	13
1.1 Veranlassung und Zielstellung .....	13
1.2 Die Colbitz-Letzlinger Heide - Naturräumlicher Überblick und Nutzung .....	14
1.3 Das Wasserwerk Colbitz.....	15
1.4 Die wägbare Lysimeterstation Colbitz .....	16
2. Auswertung der atmosphärischen Depositionsmessungen des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt auf der Lysimeterstation Colbitz, Zeitraum 1998 bis 2013, unter folgenden Gesichtspunkten: .....	21
2.1 Messung und Berechnung der Parameter .....	21
2.2 Grundaussagen und Vergleich mit Halle-Ost .....	22
3. Auswertung der Sickerwasseranalysen (Konzentrationen) der 12 Lysimeter für den Zeitraum 1993 bis 2013 .....	29
3.1 Messung und Berechnung der Parameter .....	29
3.2 Trendermittlung für die erfassten Stoffe.....	32
3.3 Auswertung der Stoffkonzentrationen und Zusammenhang mit Depositionsmessungen.....	33
4. Analyse des Niederschlagsgeschehens in Colbitz zwischen 1969 und 2013 im Kontext zu den DWD-Niederschlagsstationen Angern, Born, Dolle, Letzlingen und Zielitz sowie Ergebnisdarstellung .....	47
4.1 Messung und Korrektur.....	47
4.2 Vergleich der Messsysteme .....	48
4.3 Vergleich der Niederschlagsstationen.....	50
4.4 Weitere Trends .....	56
5. Betrachtung des innerjährlichen Gangs der meteorologischen Daten ab Juli 2010 und Ableitung erster Aussagen .....	59
6. Ermittlung der Wasserbilanz der 12 Lysimeter seit der Neubepflanzung im April 2011 und erste Interpretationen.....	71
6.1 Parameterberechnung .....	71
6.2 Wasserbilanzen der einzelnen Lysimeter .....	72
6.3 Wasserbilanzen Lysimeter 1 bis 12.....	82
6.4 Nachweis von abgesetzten Niederschlägen .....	87

7. Qualität der Daten .....	89
8. Fazit und Ausblick .....	91
9. Literaturverzeichnis .....	93
Anlagen.....	96
Anlage 1: Tagesverläufe aller Wasserhaushaltsparameter für die Jahre 2011, 2012 und 2013 für die Lysimeter 4 bis 12 (Abbildungen ah1 bis ah27). .....	97
Anlage 2: Vergleiche der mit den Lysimetern ermittelten Niederschläge der Lysimeter 2 bis Lysimeter 11 mit dem nach Hellmann ermittelten und nach Richter korrigierten Niederschlag (Abbildungen ah28 bis ah38) .....	111
Anlage 3: Monatliche Wasserbilanzen der Lysimeter 4 bis Lysimeter 12 in Tabellenform (Lysimeter 1 bis 3 im Textteil) .....	117

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hydrogeologische Übersicht mit Niederschlagsstationen des DWD und Lysimeterstation des LHW (Quelle: LHW).....	14
Abbildung 2: Schematischer hydrogeologischer Schnitt durch die Colbitz-Letzlinger Heide von Nord nach Süd (Quelle: BGR 2014).....	15
Abbildung 3: Wasserschutzgebiete der Colbitz-Letzlinger Heide mit Pumpwerk Satuelle, Überleitungskanal, Infiltration sowie Förderbrunnen (Quelle: TWM 2012). ....	16
Abbildung 4: Lage der wägbaren Lysimeterstation und Infiltrationsbecken des Wasserwerks Colbitz, Luftbildaufnahme 2009 (Quelle: LHW). ....	17
Abbildung 5: Lysimeterstation Colbitz mit Wetterstation im September 2014 (Quelle: LHW). ....	18
Abbildung 6: Anordnung der wägbaren Lysimeter mit Neubepflanzung mit <i>Calluna vulgaris</i> und <i>Calamagrostis epigejos</i> am 01.04.2011. ....	19
Abbildung 7: Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, pH-Wert, Säureeintrag und Leitfähigkeit in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	22
Abbildung 8: Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Depositionsmengen diverser Kationen in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	23
Abbildung 9: Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Depositionsmengen diverser Anionen in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	23
Abbildung 10: Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Depositionsmengen diverser Stickstoffparameter in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz.....	24
Abbildung 11: Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Depositionsmengen von Ammonium und Nitrat in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz sowie Station Halle-Ost. ....	25
Abbildung 12: Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Sulfatmengen in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz sowie Station Halle-Ost.....	25
Abbildung 13: Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Depositionsmengen diverser Schwermetalle sowie Staubbiederschlag in den Jahren 1999 bis 2012, Lysimeterstation Colbitz. Einheit y-Achse ändern .....	26
Abbildung 14: Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Mengen von Chrom, Vanadium und Arsen in den Jahren 1999 bis 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....	27
Abbildung 15: Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Mengen von Kupfer, Blei und Nickel in den Jahren 1999 bis 2012, Lysimeterstation Colbitz.....	27
Abbildung 16: Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Mengen von Zink und Mangan in den Jahren 1999 bis 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....	28

Abbildung 17: Konzentrationen von Ammonium in den Jahren 1996 bis 2007 im Sickerwasser von Lysimeter 10, Lysimeterstation Colbitz.....	32
Abbildung 18: Durchschnittliche Konzentrationen von Ammonium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.....	34
Abbildung 19: Durchschnittliche Konzentrationen von Ammonium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz....	34
Abbildung 20: Durchschnittliche Konzentrationen von Nitrat in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.....	35
Abbildung 21: Durchschnittliche Konzentrationen von Nitrat in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz.....	35
Abbildung 22: Gesamtstickstoff: atmosphärische Deposition sowie durchschnittliche Konzentrationen im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	36
Abbildung 23: Durchschnittliche Konzentrationen von Phosphor in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.....	37
Abbildung 24: Durchschnittliche Konzentrationen von Phosphor in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz....	38
Abbildung 25: Durchschnittliche Konzentrationen von Chlorid in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.....	38
Abbildung 26: Durchschnittliche Konzentrationen von Chlorid in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz....	39
Abbildung 27: Durchschnittliche Konzentrationen von Sulfat in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.....	39
Abbildung 28: Durchschnittliche Konzentrationen von Sulfat in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz.....	40
Abbildung 29: Durchschnittliche Konzentrationen von Natrium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.....	41
Abbildung 30: Durchschnittliche Konzentrationen von Natrium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz....	41
Abbildung 31: Durchschnittliche Konzentrationen von Kalium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.....	42
Abbildung 32: Durchschnittliche Konzentrationen von Kalium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz....	42
Abbildung 33: Durchschnittliche Gesamthärte des Sickerwassers der 12 Lysimeter in den Jahren 1993 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	43

Abbildung 34: Durchschnittliche Gesamthärte des Sickerwassers, gemittelt für drei Lysimetergruppen in den Jahren 1993 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....43

Abbildung 35: Durchschnittliche Konzentrationen von Mangan in den Jahren 2009 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.....45

Abbildung 36: Durchschnittliche Konzentrationen von Mangan in den Jahren 2009 bis 2012 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz....45

Abbildung 37: Durchschnittliche Konzentrationen von Aluminium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.....46

Abbildung 38: Durchschnittliche Konzentrationen von Aluminium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz....46

Abbildung 39: Tageswerte des Niederschlages, erfasst mit zwei verschiedenen Messgeräten (Hellmann-Regenmesser und Niederschlagsgeber mit Reedkontakt) zwischen 1. Juli 2010 und 30. Juni 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....49

Abbildung 40: Monatswerte des Niederschlages, erfasst mit zwei verschiedenen Messgeräten (Hellmann-Regenmesser und Niederschlagsgeber mit Reedkontakt) von Juli 2010 und Juli 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....49

Abbildung 41: Monatswerte des Niederschlages im Jahr 1982, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region. ....51

Abbildung 42: Monatswerte des Niederschlages im Jahr 1992, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region. ....51

Abbildung 43: Monatswerte des Niederschlages im Jahr 2002, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region. ....52

Abbildung 44: Monatswerte des Niederschlages im Jahr 2012, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie drei weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region. ....52

Abbildung 45: Jahreswerte des Niederschlages der Jahre 1969 bis 1979, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region. ....53

Abbildung 46: Jahreswerte des Niederschlages der Jahre 1980 bis 1990, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region. ....54

Abbildung 47: Jahreswerte des Niederschlages der Jahre 1991 bis 2001, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region. ....54

Abbildung 48: Jahreswerte des Niederschlages der Jahre 2002 bis 2013, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region. ....	55
Abbildung 49: Jahreswerte des Niederschlages der Jahre 1969 bis 2013, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie bei den zwei DWD-Niederschlagsstationen Letzlingen und Zielitz. ....	56
Abbildung 50: Prozentualer Anteil des Niederschlages in den Sommermonaten (01. April bis 30. September) am jährlichen Gesamtniederschlag der Jahre 1969 bis 2013, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz. ....	57
Abbildung 51: Prozentualer Anteil des Niederschlages in den Sommermonaten (1. April bis 30. September) am jährlichen Gesamtniederschlag der Jahre 1969 bis 2012, erfasst an der Station Zielitz.....	57
Abbildung 52: Niederschlagsreiche Tage mit mehr als 20 mm NS-Menge in den Jahren 1969 bis 2012, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz.....	58
Abbildung 53: Mittlere Temperatur, Niederschlag und mittlere Luftfeuchtigkeit in den Jahren 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz. ....	60
Abbildung 54: Globalstrahlung und potentielle Evapotranspiration für alle Tage in den Jahren 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz. ....	60
Abbildung 55: Potentielle Evapotranspiration als Funktion der Globalstrahlung für alle Tage 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz. ....	61
Abbildung 56: Potentielle Evapotranspiration als Funktion der mittleren Luftfeuchtigkeit für alle Tage 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz. ....	62
Abbildung 57: Potentielle Evapotranspiration als Funktion der Luftfeuchtigkeit um 14:00 Uhr für alle Tage 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz...63	63
Abbildung 58: Potentielle Evapotranspiration (Wert für eine Stunde) um 14:00 Uhr als Funktion der Luftfeuchtigkeit um 14:00 Uhr für alle Tage 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz. ....	64
Abbildung 59: Potentielle Evapotranspiration als Funktion der Windgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Strahlung, 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz. ....	65
Abbildung 60: Monatswerte der Wasserhaushaltsparameter gemessen mit Lysimeter 2 (durchgängige Säulen) sowie mit Klimastation ermittelt (schraffierte Säulen), Jahr 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....	66
Abbildung 61: Windrichtung in allen Stunden der Jahre 2011, 2012 und 2013 Klimastation, Lysimeterstation Colbitz. ....	67
Abbildung 62: Mittlere Windgeschwindigkeit als Funktion der jeweiligen Windrichtung in den Jahren 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz. ....	68

Abbildung 63: Windrichtung in allen Stunden des Jahres 2011, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz. ....	68
Abbildung 64: Windrichtung in allen Stunden des Jahres 2012, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz. ....	69
Abbildung 65: Windrichtung in allen Stunden des Jahres 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz. ....	69
Abbildung 66: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 1, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....	73
Abbildung 67: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 1, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....	73
Abbildung 68: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 1, 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	74
Abbildung 69: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 2, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....	74
Abbildung 70: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 2, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....	75
Abbildung 71: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 2, 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	75
Abbildung 72: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 3, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....	76
Abbildung 73: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 3, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....	76
Abbildung 74: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 3, 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	77
Abbildung 75: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 1 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	78
Abbildung 76: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 1, Handwägung, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....	81
Abbildung 77: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 1, Handwägung, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....	81
Abbildung 78: Wasserbilanzen 2011, Lysimeter 1 bis 12, Lysimeterstation Colbitz. ....	82
Abbildung 79: Wasserbilanzen 2012, Lysimeter 1 bis 12, Lysimeterstation Colbitz. ....	83
Abbildung 80: Wasserbilanzen 2013, Lysimeter 1 bis 12, Lysimeterstation Colbitz. ....	83
Abbildung 81: Wasserbilanzen 2011, Gruppe 1 bis Gruppe 4, Lysimeterstation Colbitz. ....	84
Abbildung 82: Wasserbilanzen 2012, Gruppe 1 bis Gruppe 4, Lysimeterstation Colbitz. ....	84

Abbildung 83: Wasserbilanzen 2013, Gruppe 1 bis Gruppe 4, Lysimeterstation Colbitz. .85	85
Abbildung 84: Wasserbilanzen 2011, 2012 und 2013 zusammengefasst zu Durchschnittswerten, Gruppe 1 bis 3 und Gruppe 4, Lysimeterstation Colbitz.....86	86
Abbildung 85: Wasserbilanzen 2011, 2012 und 2013 zusammengefasst, Gruppe 1 bis 3 und Gruppe 4, ohne Werte der Lysimeter 1, 5 und 8 (Grund: Messwertqualität), Lysimeterstation Colbitz. ....86	86
Abbildung 86: Zunahme der Gewichte von Lysimeter 5 und 6 in der Nacht vom 9. zum 10. Juni 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....88	88
Abbildung ah1: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 4, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....97	97
Abbildung ah2 Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 4, 2012 Lysimeterstation Colbitz. ....98	98
Abbildung ah3 Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 4, 2013 Lysimeterstation Colbitz. ....98	98
Abbildung ah4 Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 5, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....99	99
Abbildung ah5: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 5, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....99	99
Abbildung ah6: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 5, 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....100	100
Abbildung ah7: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 6, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....100	100
Abbildung ah8: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 6, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....101	101
Abbildung ah9: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 6, 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....101	101
Abbildung ah10: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 7, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....102	102
Abbildung ah11: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 7, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....102	102
Abbildung ah12: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 7, 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....103	103
Abbildung ah13: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 8, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....103	103
Abbildung ah14: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 8, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....104	104

Abbildung ah15: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 8, 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	104
Abbildung ah16: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 9, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....	105
Abbildung ah17: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 9, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....	105
Abbildung ah18: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 9, 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	106
Abbildung ah19: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 10, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....	106
Abbildung ah20: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 10, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....	107
Abbildung ah21: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 10, 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	107
Abbildung ah22: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 11, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....	108
Abbildung ah23: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 11, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....	108
Abbildung ah24: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 11, 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	109
Abbildung ah25: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 12, 2011, Lysimeterstation Colbitz. ....	109
Abbildung ah26: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 12, 2012, Lysimeterstation Colbitz. ....	110
Abbildung ah27: Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 12, 2013, Lysimeterstation Colbitz. ....	110
Abbildung ah28: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 2 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	111
Abbildung ah29: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 3 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	112
Abbildung ah30: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 4 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	112
Abbildung ah31: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 5 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	113
Abbildung ah32: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 6 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	113

Abbildung ah33: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 7 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	114
Abbildung ah34: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 8 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	114
Abbildung ah35: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 9 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	115
Abbildung ah36: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 10 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	115
Abbildung ah37: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 11 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	116
Abbildung ah38: Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 12 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter. ....	116

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> ungenügender Sickerwasseranfall für Probennahme zur Analyse der Sickerwasserbeschaffenheit am Beispiel des Trockenjahres 2003, Lysimeterstation Colbitz.....	29
<b>Tabelle 2:</b> Parameterspektrum der Sickerwasseranalyse, Lysimeterstation Colbitz (Quelle LHW). .....	31
<b>Tabelle 3:</b> Die untersuchten Niederschlagsmessstationen in der Börde bzw. Altmark....	50
<b>Tabelle 4:</b> meteorologische Sensoren (Quelle: LHW).....	59
<b>Tabelle 5:</b> Wasserbilanz 2011, Lysimeter 1, Lysimeterstation Colbitz. ....	78
<b>Tabelle 6:</b> Wasserbilanz 2012, Lysimeter 1, Lysimeterstation Colbitz. ....	79
<b>Tabelle 7:</b> Wasserbilanz 2013, Lysimeter 1, Lysimeterstation Colbitz. ....	79
<b>Tabelle 8:</b> Wasserbilanz 2011, Lysimeter 2, Lysimeterstation Colbitz. ....	79
<b>Tabelle 9:</b> Wasserbilanz 2012, Lysimeter 2, Lysimeterstation Colbitz. ....	79
<b>Tabelle 10:</b> Wasserbilanz 2013, Lysimeter 2, Lysimeterstation Colbitz. ....	79
<b>Tabelle 11:</b> Wasserbilanz 2011, Lysimeter 3, Lysimeterstation Colbitz. ....	79
<b>Tabelle 12:</b> Wasserbilanz 2012, Lysimeter 3, Lysimeterstation Colbitz. ....	80
<b>Tabelle 13:</b> Wasserbilanz 2013, Lysimeter 3, Lysimeterstation Colbitz. ....	80
<b>Tabelle 14:</b> Wasserbilanz 2011, Lysimeter 1, Handwägung, Lysimeterstation Colbitz. ..	80
<b>Tabelle 15:</b> Wasserbilanz 2012, Lysimeter 1, Handwägung, Lysimeterstation Colbitz. ..	80

## 1. Einleitung

### 1.1 Veranlassung und Zielstellung

In der Colbitz-Letzlinger Heide waren nach der Erweiterung des Wasserwerkes Colbitz im Jahre 1968 12 wägbare monolithische Lysimeter und eine Frostlysimeter- bzw. Großlysimeteranlage (1972) eingerichtet worden. Die wägbare Lysimeterstation wird im Rahmen der gewässerkundlichen Messnetze des Landes Sachsen-Anhalt vom Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft (LHW) betrieben. Außerdem befinden sich seit 1968 am Standort mehrere Niederschlagsmessstellen sowie seit 2010 eine meteorologische Station. Mit der Errichtung dieser Wetterstation wurde auch die Datenerfassung der Lysimeter grundlegend erneuert, außerdem erfolgte im Juli 2011 nach Empfehlungen eines Gutachtens (FUGRO-HGN, 2009) eine Neubepflanzung der Lysimetergefäße.

Das mittlerweile 45jährige, nahezu kontinuierliche Monitoring des Niederschlages in Colbitz sowie fünf weiterer Niederschlagsstationen des DWD (Deutscher Wetterdienst) in der Region sowie die Daten der genannten Lysimeter und der Wetterstation bildeten die Grundlage des vorliegenden Berichtes. Weiterhin wurden Beschaffenheitsdaten vom Sickerwasser aller 12 Lysimeter und Daten zur Stoffdeposition am Standort Colbitz in die Untersuchungen einbezogen. Mit Hilfe des umfangreichen Datenbestandes waren Veränderungen im Wasser- und Stoffhaushalt des Standortes zu untersuchen.

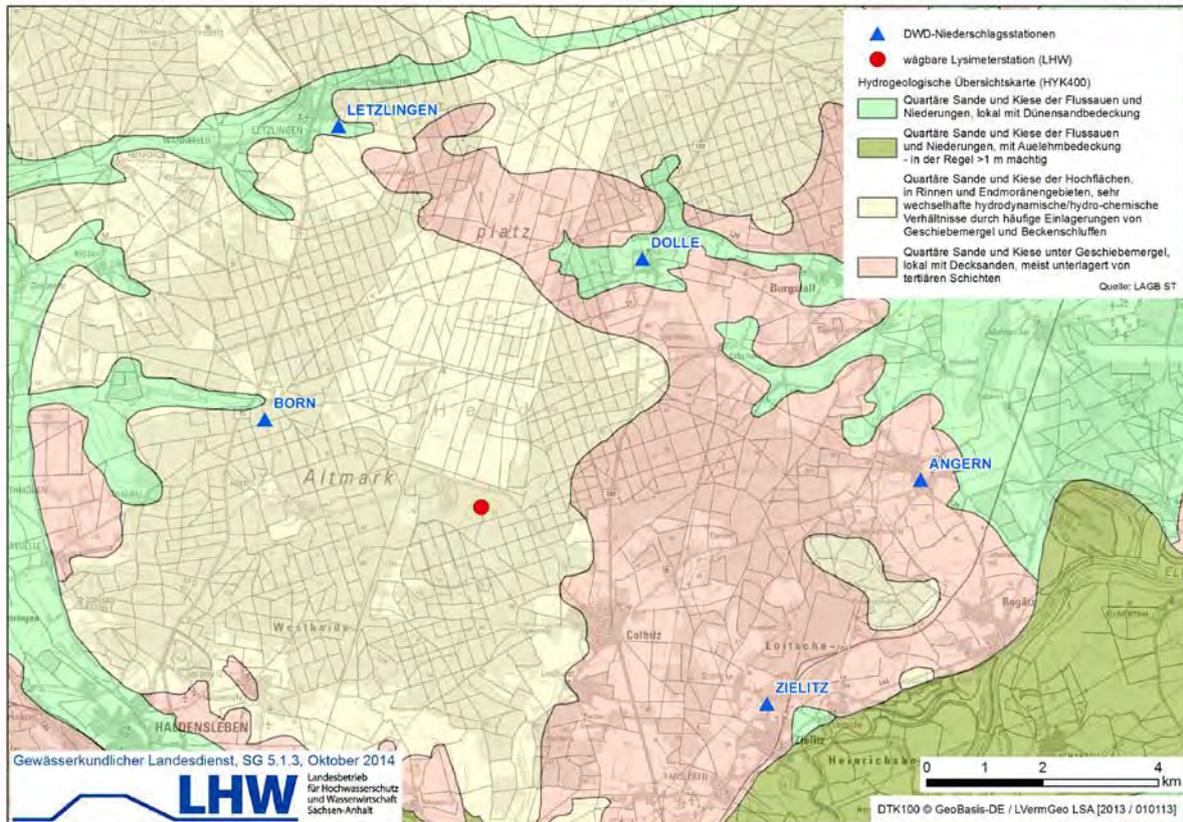
Die Arbeiten umfassten

- Erstellung qualitativer und quantitativer Grundaussagen über die atmosphärischen Stoffeinträge am Standort Colbitz und die Ableitung von Aussagen zur Wirkung der Stoffeinträge auf das System Sickerwasser und Grundwasser.
- Trendermittlung für die im Sickerwasser erfassten Nährstoffe und Auswertung des Spurenstoffes Aluminium unter dem Gesichtspunkt der Bodenversauerung.
- Herstellen eines Zusammenhanges zwischen den deponierten Stoffmengen und den Stoffgehalten im Sickerwasser.
- Durchführung der Niederschlagskorrektur der täglichen Messwerte und Berücksichtigung der Anpassung des Messnetzes.
- Vergleich der Niederschläge mit anderen Stationen und Trendermittlung.
- Auswertung der meteorologischen Daten ab Juli 2010.
- Ermittlung der Wasserbilanz der 12 Lysimeter seit der Neubepflanzung im April 2011 und erste Interpretationen.
- Untersuchungen, wie sich Vegetationstypen Land-Reitgras (*Calamagrostis epigejos*) und Besenheide (*Calluna vulgaris*) auf den Gesamtabfluss auswirken.

Der Auftragnehmer, Einzelunternehmer Dr. agr. Jens Hagenau, wurde vom Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt mit Schreiben vom 13.09.2013 auf der Grundlage des Angebotes vom 04.09.2013 mit der Durchführung der Arbeiten beauftragt.

## 1.2 Die Colbitz-Letzlinger Heide - Naturräumlicher Überblick und Nutzung

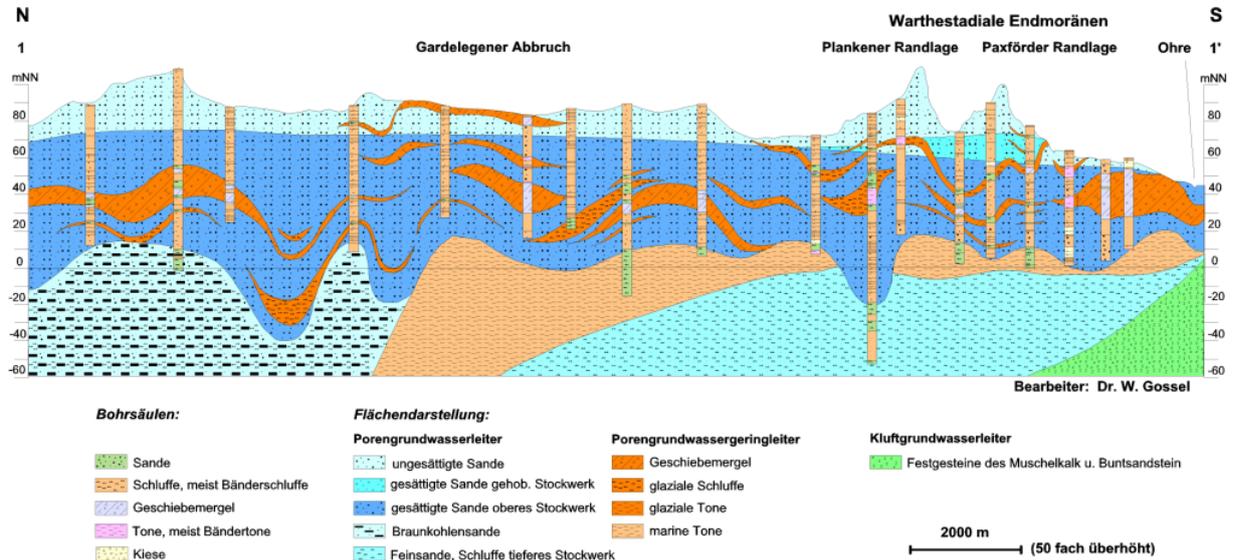
Die Colbitz-Letzlinger Heide (CLH) erstreckt sich im Norden Sachsen-Anhalts auf einer Fläche von ca. 500 bis 600 km<sup>2</sup> und kann morphologisch als eine saalezeitliche Niedertaulandschaft (Warthe-Stadium) angesprochen werden. Im Laufe der Elster- und Saalekaltzeiten kam es hier zur Sedimentation von Sanden und Kiesen (Abbildung 1), die Gesamtmächtigkeiten von bis zu 100 m aufweisen. Zwischen diesen grundwasserführenden Sedimenten sind lokal tonig-schluffige Zwischenlagen eingeschaltet, welche jedoch keine zusammenhängenden grundwasserstauenden Schichten bilden. (DECH und GLASER 1993).



**Abbildung 1:** Hydrogeologische Übersicht mit Niederschlagsstationen des DWD und Lysimeterstation des LHW (Quelle: LHW).

Die Basis des süßwasserführenden Grundwasserstockwerkssystems bilden tertiäre Tone. Charakteristisch für den geologischen Aufbau der Colbitz-Letzlinger Heide ist der am West-, Ost- und Südrand verbreitete Geschiebemergel. Im Inneren der Heide fehlt dieser. Hier sind quartäre Sande und Kiese anzutreffen, die das versickernde Niederschlagswasser aufnehmen. Aufgrund des am Rand anzutreffenden Geschiebemergels und der im Liegenden vorhandenen Tonablagerungen sammelt sich das Grundwasser, ohne das es seitlich abfließen oder in tiefere, mesozoische Schichten vordringen kann (GÖTSCH et al. 1933).

Abbildung 2 zeigt einen hydrogeologischen Schnitt durch die Colbitz-Letzlinger Heide von Nord nach Süd (BGR 2014), darin sind die flächenhafte Verbreitung der grundwasserführenden Schichten und die lokal verbreiteten Grundwasserstauer (Geschiebemergel und Tone) sehr gut erkennbar.



**Abbildung 2:** Schematischer hydrogeologischer Schnitt durch die Colbitz-Letzlinger Heide von Nord nach Süd (Quelle: BGR 2014).

Die Colbitz-Letzlinger Heide besitzt wenig oberirdische Abflüsse. Sie wird von Niederungsgebieten eingerahmt. Die Fließgewässer entspringen am Rand rund um die Heide und entwässern das Gebiet zur Ohre, Milde, Uchte sowie Tanger und zum Secantsgraben.

Bis 1934 wurde die Colbitz-Letzlinger Heide ausschließlich forstwirtschaftlich genutzt. Parallel zur Entwicklung der Grundwassergewinnung für Trinkwasserzwecke wurde die militärische Nutzung im zentralen Bereich der Heide aufgenommen. Insbesondere zwischen 1949 und 1994 wurde der Wald weitflächig dezimiert. Über Jahrzehnte entwickelte sich so im Kernbereich eine Offenlandschaft mit Heide- und Grasvegetation, während die Randbereiche von Kieferbeständen dominiert werden. Seit 1994 nutzt die Bundeswehr den Truppenübungsplatz Altmark (Bundeswehr Streitkräftebasis 2011).

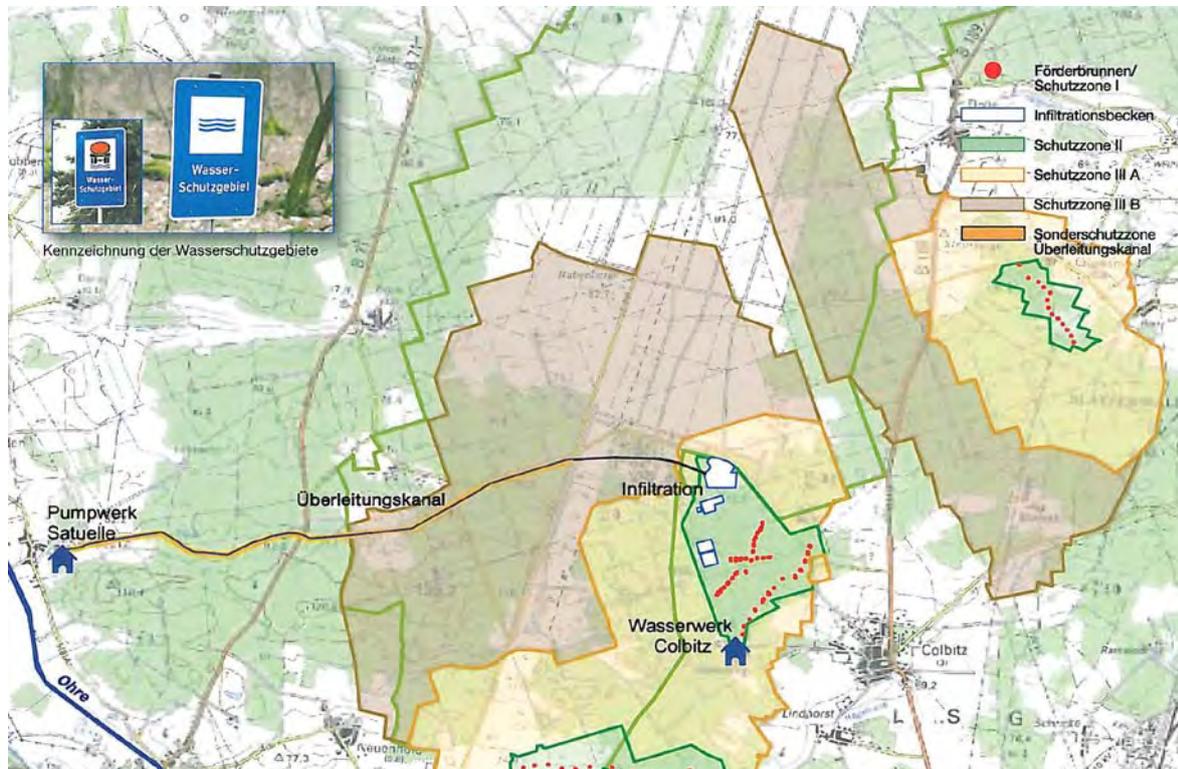
### 1.3 Das Wasserwerk Colbitz

Das Wasserwerk Colbitz wird von der Trinkwasserversorgung Magdeburg GmbH (TWM) betrieben. Es versorgt die Stadt Magdeburg und ihre Umgebung bereits seit 1932 mit Trinkwasser, welches in der Colbitz-Letzlinger Heide aus verschiedenen Grundwasserfassungen gewonnen wird.

Die natürliche Grundwasserneubildung reichte Anfang der 1960-er Jahre allerdings nicht mehr aus, um langfristig den Wasserbedarf im Versorgungsgebiet Magdeburg zu sichern. Deshalb wurde 1963 mit dem Pumpwerk Satuelle der Betrieb zur künstlichen Grundwasseranreicherung aufgenommen und damit die Voraussetzungen zur erhöhten Grundwasserentnahme geschaffen (WERNECKE und HELLMANN 1982). Über ein System

wird hierbei das Wasser der Ohre in Infiltrationsbecken übergeleitet und dort versickert, folglich Abbildung 3.

Durch die Erweiterung des Wasserwerks Colbitz wird Magdeburg und sein Umland seit 1968 ausschließlich mit Trinkwasser aus der Colbitz-Letzlinger Heide versorgt (TWM 2012).



**Abbildung 3:** Wasserschutzgebiete der Colbitz-Letzlinger Heide mit Pumpwerk Satuelle, Überleitungskanal, Infiltration sowie Förderbrunnen (Quelle: TWM 2012).

#### 1.4 Die wägbare Lysimeterstation Colbitz

Zu Beginn des Jahres 1962 entstand im Zusammenhang mit dem Bau des Wasserwerks Colbitz II und den dazu notwendigen Untersuchungen zur Infiltration in der Wasserwirtschaftsdirektion (WWD) Magdeburg eine Konzeption zum Vergleich natürlicher und künstlicher Versickerung. Im Frühjahr 1962 unterbreiteten Mitarbeiter des Instituts für Wasserwirtschaft, der WWD Magdeburg und der Universität Leipzig den Vorschlag zum Bau einer wägbaren Lysimeteranlage sowie zum Bau eines nichtwägbaren Forstlysimeters<sup>1</sup> (Großlysimeter) (WEBER 1974).

Im Rahmen des hydrologischen Beobachtungsprogramms der Wasserwirtschaft zur Erfassung der Wasserressourcen im Binnenland wurden auf beiden Anlagen Felduntersuchungen durchgeführt. Folglich KORTÜM und HELBIG (1980) war das Ziel der Untersuchungen die experimentelle Erfassung des Wasserhaushalts bewaldeter Areale, insbesondere der Grundwasserneubildung unter Waldbeständen und offenen Heideflächen.

<sup>1</sup> Das Forstlysimeter wird momentan von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW FVA) in Göttingen betrieben (Abteilung D - Umweltkontrolle, Sachgebiet Intensives Umweltmonitoring).

Die wägbare Lysimeterstation wurde im Oktober 1968 in Betrieb genommen. Sie befindet sich auf einer Lichtung im Wald in der Nähe der Infiltrationsbecken des Wasserwerkes Colbitz (Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Lage der wägbaren Lysimeterstation und Infiltrationsbecken des Wasserwerkes Colbitz, Luftbildaufnahme 2009 (Quelle: LHW).

Die Station umfasst eine Fläche von 200 m<sup>2</sup> (25 m x 8 m). Sie ist mit zwölf wägbaren Lysimetern ausgestattet, welche monolithisch an drei verschiedenen Standorten in der Colbitz-Letzlinger Heide gewonnen wurden. Die Monolithe beinhalten typische Bodenarten der Colbitz-Letzlinger Heide, folglich auch Abbildung 6. Die Lysimetergefäße selbst besitzen eine Grundfläche von 1 m<sup>2</sup> und eine nutzbare Tiefe von 2 m. Abbildung 5 zeigt die wägbare Lysimeteranlage mit Wetterstation.

Seit Inbetriebnahme der Station 1968 werden im Rahmen des Monitorings der Niederschlag (Hellmann-Regenmesser, ebenerdig und in 1 m Höhe), der Abfluss der 12 Lysimeter und die Gewichtsänderung der 12 Lysimeter kontinuierlich aufgezeichnet.

Die Probennahme für die Bestimmung der Beschaffenheit des Sickerwassers erfolgt einmal monatlich seit Juni 1992 an Lysimeter 1 bis 6, für alle 12 Lysimeter seit Juni 1993.

Daneben führt das Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU) seit 1998 atmosphärische Depositionsmessungen auf der Lysimeterstation durch.



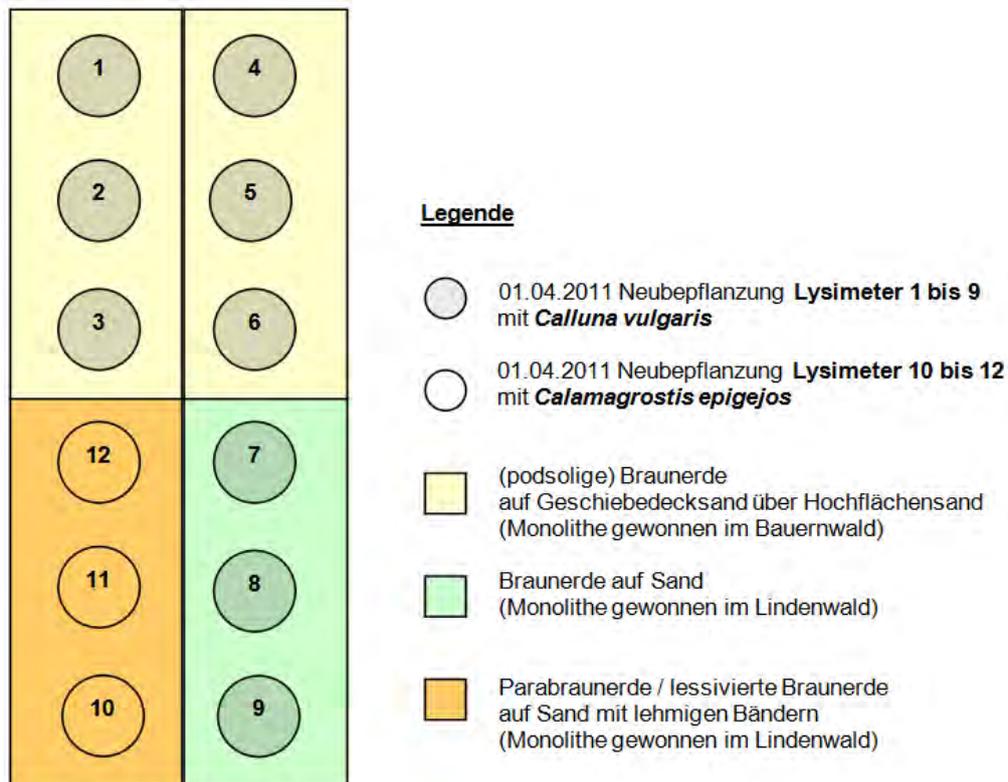
**Abbildung 5:** Lysimeterstation Colbitz mit Wetterstation im September 2014 (Quelle: LHW).

Die Lysimeter wurden seit 1968 mehrmals mit typischer Heide- und Offenlandvegetation bepflanzt und danach der natürlichen Sukzession überlassen, um einen für Waldlichtungen repräsentativen Zustand zu erhalten. Eingriffe erfolgten nur in Form von Mahd (1- bis 2-mal jährlich), wenn es aufgrund der unterschiedlich hohen Vegetation zu Inseleffekten kam.

Die Pflanzendecke auf und um die Lysimeter hatte seit der letzten Bepflanzung 1993 eine so heterogene Zusammensetzung angenommen, dass FUGRO-HGN (2009) zu folgendem Schluss kam: „Für die weitere Forschung sollte ggf. eine systematische Neubepflanzung der Lysimetertöpfe in Erwägung gezogen werden. Regelmäßige Pflegeeingriffe zum Erhalt eines definierten Pflanzenbestandes sind unvermeidbar“.

In Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Landwirtschaft, Ökotropologie und Landschaftsentwicklung der Hochschule Anhalt wurden deshalb Anfang April 2011 alle 12 Lysimeter neu bepflanzt. Die in dem Forschungsprojekt „Einrichtung und Erfassung von vegetationskundlichen Dauerbeobachtungsflächen in der Colbitz-Letzlinger Heide“ gewonnenen Erkenntnisse (Professor Hellriegel Institut e. V. 2009) flossen in die Wahl der Bepflanzung ein. Die Lysimeter 1 bis 9 (Bodenart Sand) wurden mit Besenheide (*Calluna vulgaris*) bepflanzt. Lysimeter 10 bis 12 enthalten neben Sand auch bindige Anteile und wurden deshalb mit Grassoden von Land-Reitgras (*Calamagrostis epigejos*) bepflanzt. Die Grassoden und die Besenheide wurden auf dem Truppenübungsplatz Altmark im Zentrum der Colbitz-Letzlinger Heide entnommen. Einen schematischen Überblick über die Neubepflanzung gibt Abbildung 6. Die aktuelle Vegetation auf den Lysimetergefäßen spiegelt damit typische Vegetationsformen der Heide wider.

Von den ersten Mahdmaßnahmen (Mulchmäh, Mäh mit Abtransport und Feuer) im Frühjahr 2012 erholten sich die Bestände der *Calluna vulgaris* nur unzureichend. Die Heidepflanzen waren teilweise noch nicht etabliert, sodass sie insbesondere auf den abgebrannten Lysimetertöpfen im Laufe der Vegetationsperiode abstarben, weshalb im April 2013 eine Neubepflanzung oder Nachpflanzung erforderlich wurde. Auch die Pflanzaktion im April 2013 führte aufgrund von Frühjahrstrockenheit zu keinem befriedigenden Anwuchsergebnis, so dass ein erneuter Bepflanzungsversuch im September 2013 vorgenommen wurde. Entnommen wurden die Heidepflanzen aus reinen Heidebeständen auf dem Truppenübungsplatz Altmark, vornehmlich im südlichen Bereich.



**Abbildung 5:** Anordnung der wägbaren Lysimeter mit Neubepflanzung mit *Calluna vulgaris* und *Calamagrostis epigejos* am 01.04.2011.

Die Lysimeterstation erfuhr im Laufe ihres Betriebs einige Bau- und Instandsetzungsmaßnahmen, insbesondere Mitte der 1990-er Jahre sowie 2010.

Im Rahmen einer Diplomarbeit (SIEBNER 1995) wurde das Verfahren zur Ermittlung des Sickerwassers angepasst. Es wurden Staueffekte (künstlich erzeugte wassergesättigte Bodenzone) im unteren Drittel der Lysimeter vermutet, da das Sickerwasser lediglich in Dekaden abgelassen wurde. In die Lysimeterböden wurde deshalb eine Öffnung eingefügt, so dass das Sickerwasser permanent gravimetrisch austreten kann.

Daneben wurden im Rahmen einer Untersuchung durch die Universität Göttingen Undichtigkeiten an den Lysimetergefäßen festgestellt, welche durch Korrosion im Bereich der Schweißnähte am Lysimeterboden verursacht wurde. Daraufhin wurde die Lysimeteranlage im Frühjahr 1996 umfassend saniert und die Lysimetergefäße mit einer PE-Unterkonstruktion versehen. Auch der Sickerwasserablauf wurde dabei endgültig

umgebaut, so dass das anfallende Sickerwasser allein gravimetrisch am Lysimeterboden austritt und die Sickerwassermenge von Kippwaagen erfasst wird (UFZ 1996).

Die Lysimeterstation wurde 2010 um eine Klimastation ergänzt. Hierbei werden nun Niederschlag (ebenerdig und in 1 m Höhe), Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte sowie Globalstrahlung erfasst. Die Messung erfolgt alle 10 min. Die meteorologischen Messdaten sowie die Gewichtsänderung und der Sickerwasserabfluss der 12 Lysimeter werden digital in einem Datenlogger aufgezeichnet. Die Datenaufzeichnung wurde auf den neuesten technischen Stand gebracht.

## **2. Auswertung der atmosphärischen Depositionsmessungen des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt auf der Lysimeterstation Colbitz, Zeitraum 1998 bis 2013, unter folgenden Gesichtspunkten:**

- Erstellung qualitativer und quantitativer Grundaussagen über die atmosphärischen Stoffeinträge am Standort Colbitz
- Aussagen zur Wirkung der Stoffeinträge auf das System Sickerwasser und Grundwasser

### **2.1 Messung und Berechnung der Parameter**

Seit Juni 1998 bzw. Anfang 1999 liegen Daten zur Deposition am Lysimeter Colbitz vor. Die Bestimmung der Deposition von wasserlöslichen Anionen (z. B. Chlorid, Nitrit, Nitrat und Sulfat) und Kationen (z. B. Ammonium, Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium) wird in der neuen, noch in Bearbeitung befindlichen VDI-Richtlinie 4320 Blatt 3 „Messung atmosphärischer Depositionen - Bestimmung der Deposition von wasserlöslichen Anionen und Kationen - Probenahme mit Bulk- und Wet-Only-Sammlern“ beschrieben. Die allgemeinen Anforderungen zu Art, Ausführung, Aufstellung und Exposition der Probenahmesysteme sind in der VDI 4320 Blatt 1 (2012) zu finden: Die Probenahme erfolgt mit Trichter-Flasche- (LWF-Niederschlagssammler RS200, Eigenbrodt (klimatisiert)) oder Topf-Sammlern (Bergerhoff). Für die Analyse der löslichen Anionen und Kationen wird die Ionenchromatographie genutzt. Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgt mit der Potentiometrie und der elektrischen Leitfähigkeit mit der Konduktometrie.

Die Messung von pH-Wert, Leitfähigkeit, Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Fluorid, Chlorid, Hydrogencarbonat, Hydrogenphosphat, Sulfat sowie von allen Stickstoffparametern erfolgte ab 1998 mittels Bulksammlern nach Eigenbrodt. Ab 2009 wurde auf die Messung mit LWF-Niederschlagssammlern vom Typ RS200 umgestellt, bedingt durch die Umstellung der Lysimeteranlage auf eine autarke Stromversorgung. Die Parameter Staubbiederschlag sowie die Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Arsen, Kupfer, Zink, Vanadium und Mangan werden seit 1999 mithilfe von Bergerhoff-Sammlern ermittelt. Ab dem Jahre 2003 werden damit auch die Mengen der Schwermetalle Cobalt, Antimon und Thallium gemessen.

Auf die letztgenannte Gruppe von Schwermetallen wird hier nicht weiter eingegangen. Für einige wichtige Parameter wie Stickstoffparameter und Sulfat erfolgte ein Vergleich mit den Depositionsmessungen des LAU am Standort Halle-Ost.

## 2.2 Grundaussagen und Vergleich mit Halle-Ost

### pH-Wert, Säureeintrag und Leitfähigkeit

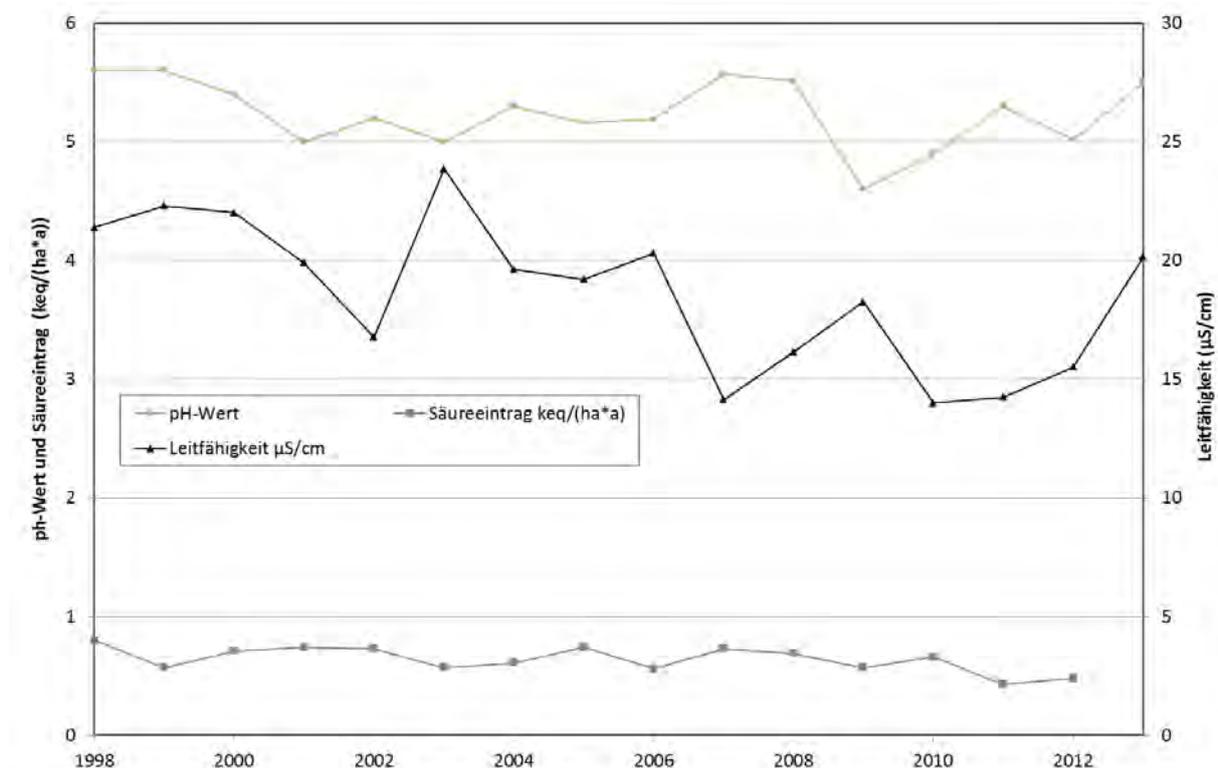
In Abbildung 7, die die durchschnittlichen Jahreswerte genannter Parameter für die Jahre 1999 bis 2012 bzw. 2013 zeigt, sind keinerlei Trends zu erkennen.

#### Kationen

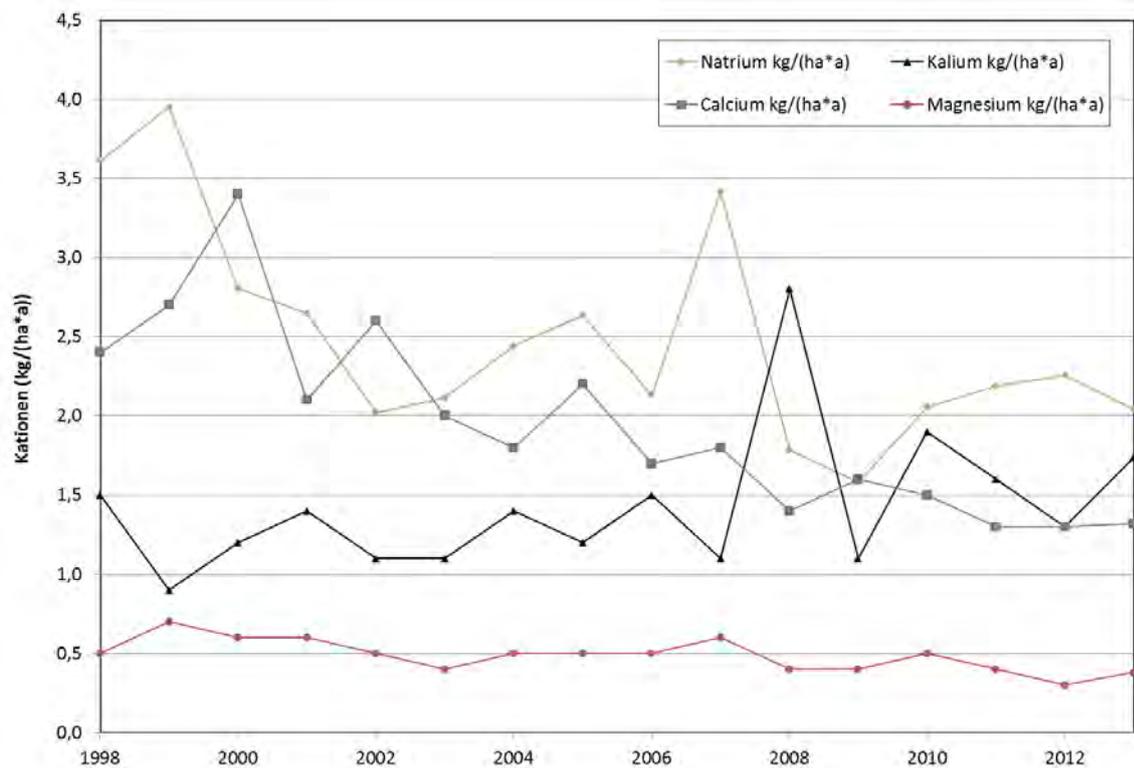
Die jährlichen Depositionsmengen der Kationen für die Jahre 1999 bis 2013 sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Menge von Natrium geht - von der Spitze im Jahr 2007 abgesehen - tendenziell zurück, ebenso die Depositionsmenge von Calcium. Die Deposition von Kalium steigt im selben Maße geringfügig. Dies deckt sich sehr gut mit den Ergebnissen der Sickerwasseranalyse (vgl. Kapitel 3, Abbildungen 29 bis 34) Bei Magnesium ist kein Trend zu erkennen.

#### Anionen inkl. Stickstoffparameter

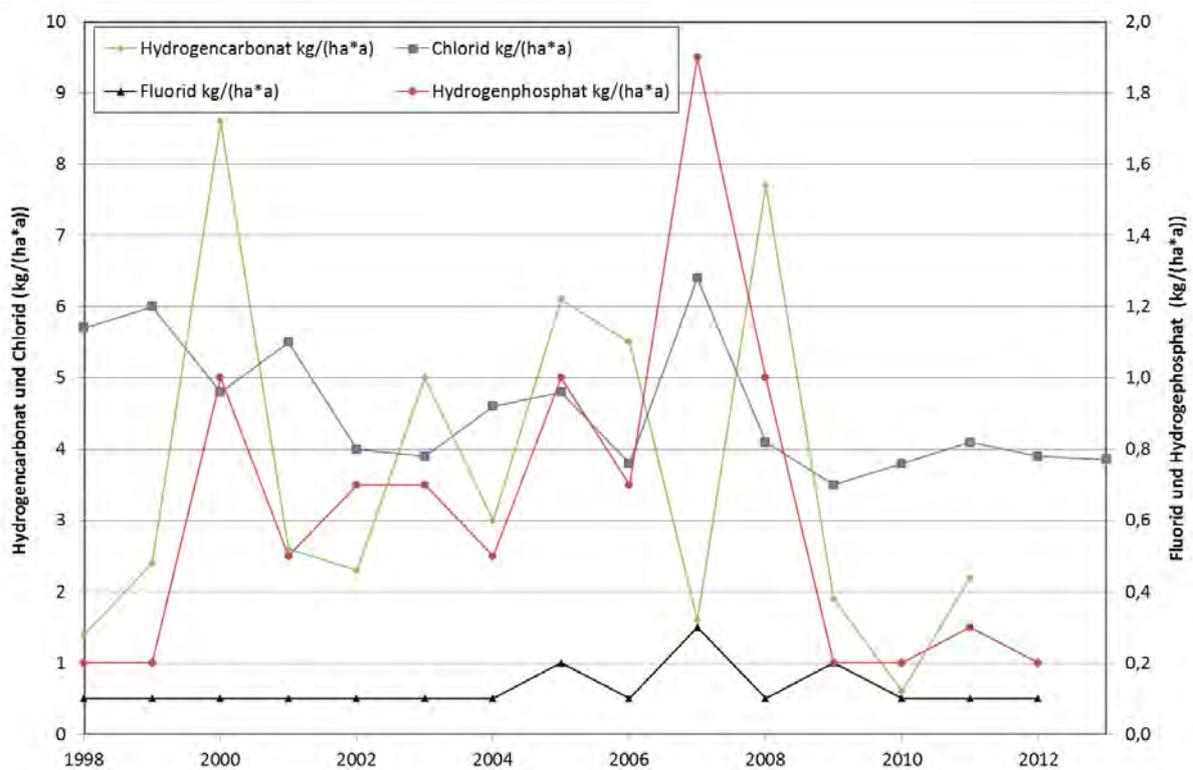
Die jährlichen Depositionsmengen der Anionen für die Jahre 1999 bis 2012 bzw. 2013 sind in Abbildung 9 dargestellt, während Abbildung 10 die Depositionsmengen der Stickstoffparameter für denselben Zeitraum zeigt. In Abbildung 9 sind keine Trends zu sehen, lediglich die hohen Amplituden von Hydrogencarbonat und -phosphat fallen auf. Für die Stickstoffparameter sind keine Trends auffällig sichtbar. Ammonium, Nitrat (und somit folglich Gesamtstickstoff) verlaufen in einer geringen Schwankungsbreite. Nitrit spielt eine untergeordnete Rolle (Abbildung 10).



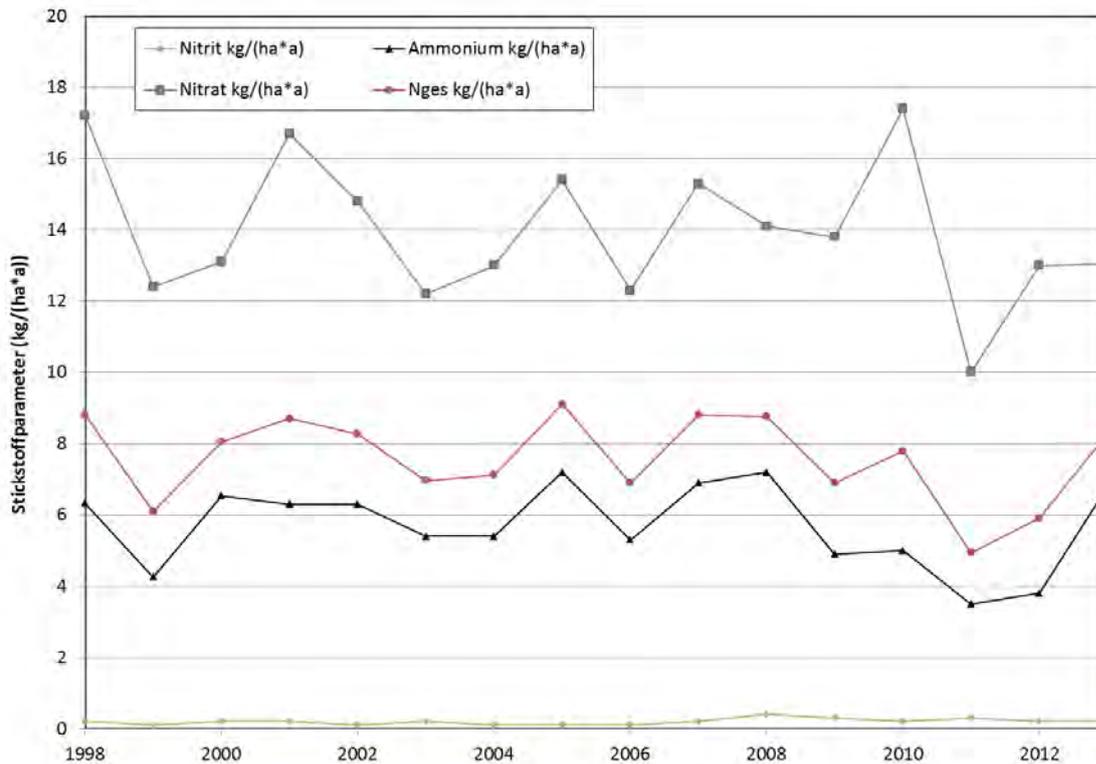
**Abbildung 7:** Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, pH-Wert, Säureeintrag und Leitfähigkeit in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 8:** Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Depositionsmengen diverser Kationen in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 9:** Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Depositionsmengen diverser Anionen in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz.



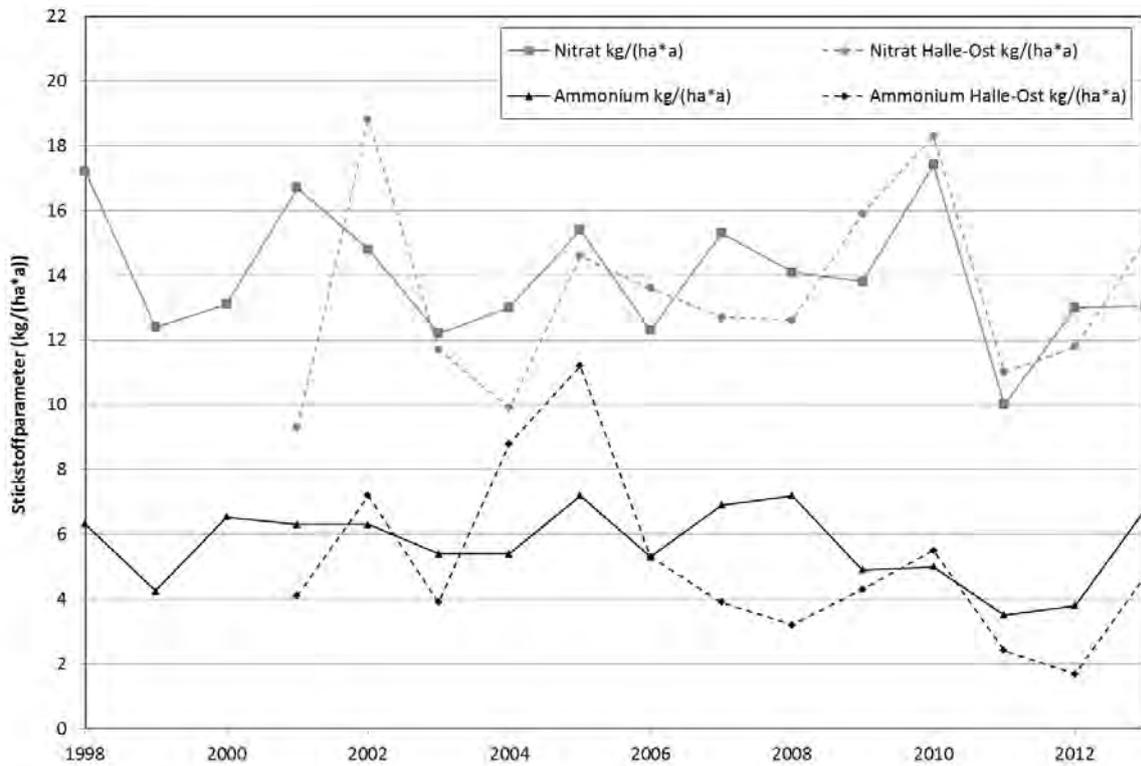
**Abbildung 10:** Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Depositionsmengen diverser Stickstoffparameter in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz.

### Vergleich der Stickstoffparameter sowie Sulfat in Colbitz mit Depositionsdaten der Messstation Halle-Ost

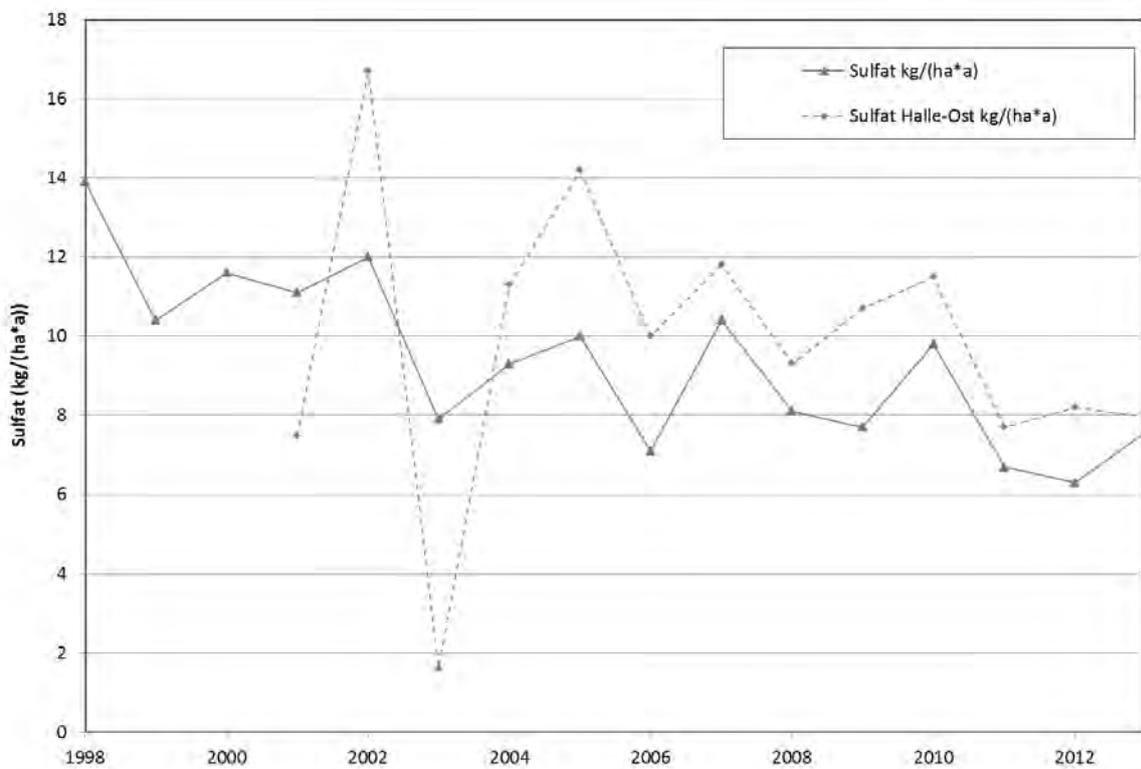
Abbildung 11 zeigt neben den Depositionsmengen von Ammonium und Nitrat in Colbitz, wie bereits in Abbildung 10 dargestellt, auch die Depositionsmengen dieser Parameter an der Messstation in Halle-Ost. Die Daten aus Halle-Ost wurden mit LWF-Niederschlagssammlern vom Typ RS200 ermittelt. Der Standort in Halle ist industriell geprägt. Tendenziell verlaufen die Depositionen für beide Stoffe an beiden Standorten relativ im Gleichklang, wenn auch mit unterschiedlich stark ausgeprägten Amplituden.

Auf die gleiche Art erfolgte in Halle-Ost die Ermittlung der Sulfatmengen, die für Abbildung 12 den Sulfatmengen in Colbitz gegenübergestellt wurde.

Am Standort Colbitz ist eine tendenzielle Abnahme der Sulfat-Deposition sehr gut zu erkennen, was sich letztlich auch im Sickerwasser (Kapitel 3, Abb. 27 und 28) niederschlägt. In Halle-Ost ist dieser Trend grundsätzlich auch vorhanden, welcher aber durch die Spitzen in den Jahren 2002 und 2003 ein wenig verwischt wird.



**Abbildung 11:** Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Depositionsmengen von Ammonium und Nitrat in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz sowie Station Halle-Ost.

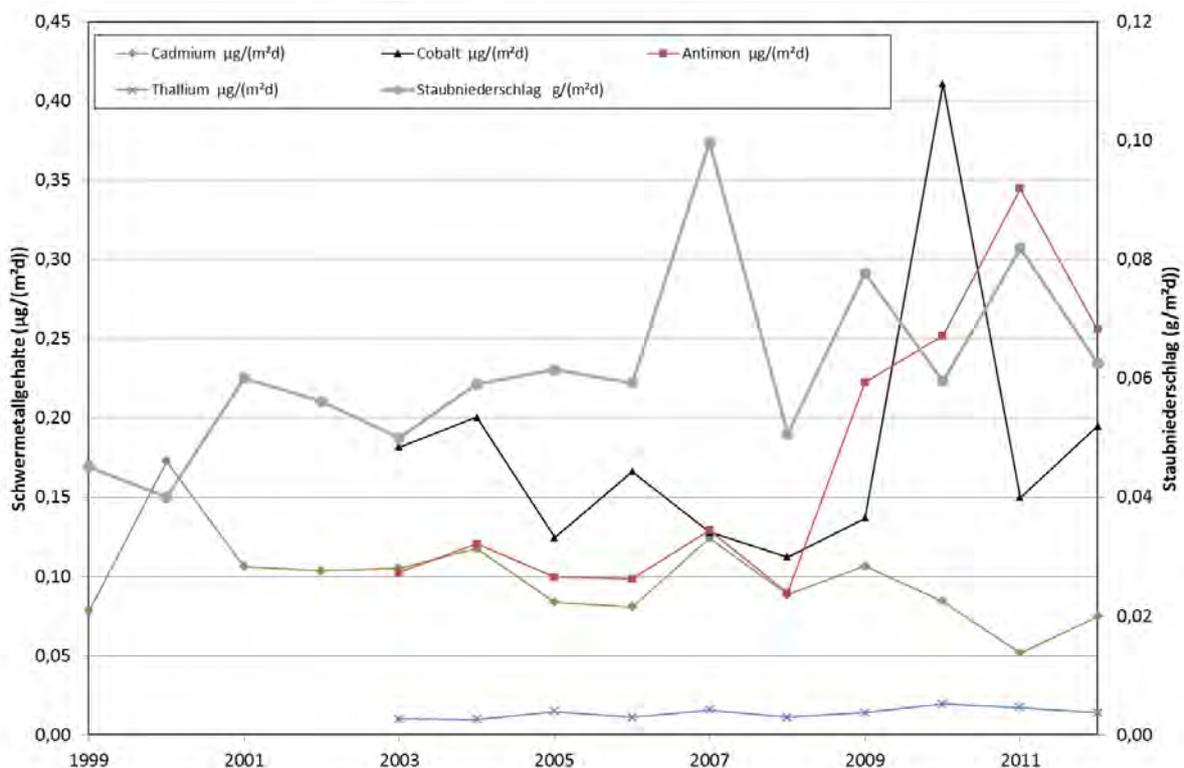


**Abbildung 12:** Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Sulfatmengen in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz sowie Station Halle-Ost.

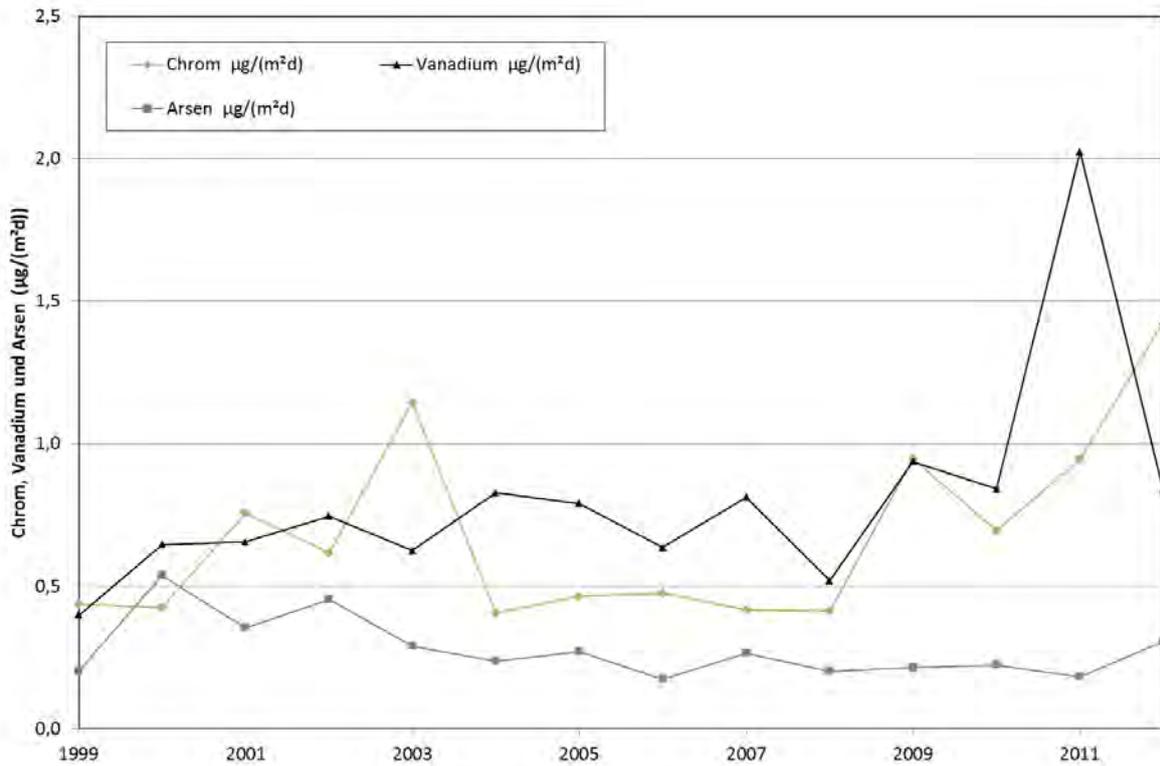
## Staub und Schwermetalle

Die jährlichen Depositionsmengen von Staubbiederschlag und Schwermetallen in den Jahren 1999 bis 2012 sind in den Abbildungen 13 bis 16 dargestellt. Die Zusammenfassung der Schwermetalle in die einzelnen Abbildungen erfolgte ausschließlich aufgrund der Dimensionen der Werte und für deren Übersichtlichkeit. Trends sind lediglich für Antimon (Abbildung 13, tendenziell steigend) sowie für Blei (Abbildung 15, tendenziell abnehmend) zu erkennen. Die Werte sind angegeben in jährlichen Durchschnittswerten in der Einheit Mikrogramm pro Quadratmeter und Tag, also  $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ .

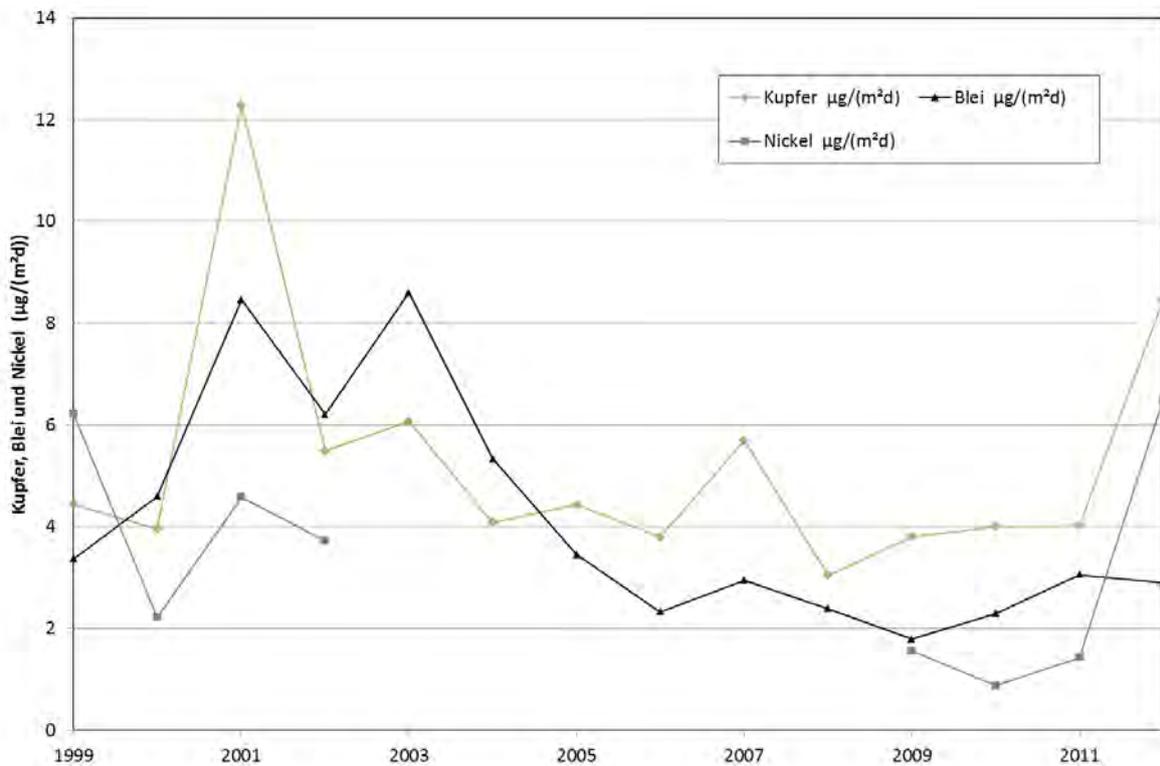
Mangan verhält sich sprunghaft mit einer Amplitude von 25 bis 130 Mikrogramm pro Quadratmeter und Tag (Abbildung 16). Ein Zusammenhang zwischen den Depositionen von Mangan und den Verläufen der Mangankonzentration im Sickerwasser, die zwischen 2010 und 2013 in einigen Lysimetern große Sprünge aufweisen (siehe Kapitel 3), kann aber nicht erkannt werden.



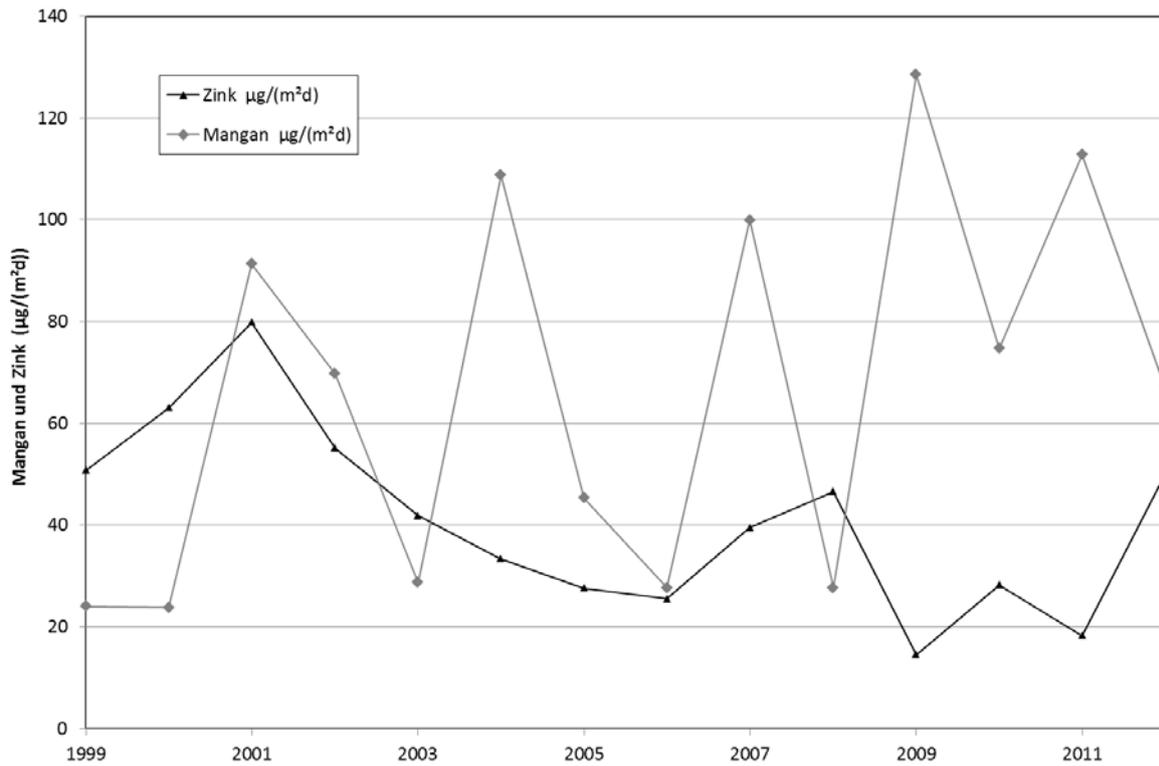
**Abbildung 13:** Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Depositionsmengen diverser Schwermetalle sowie Staubbiederschlag in den Jahren 1999 bis 2012, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 14:** Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Mengen von Chrom, Vanadium und Arsen in den Jahren 1999 bis 2012, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 15:** Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Mengen von Kupfer, Blei und Nickel in den Jahren 1999 bis 2012, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 16:** Depositionsmessung des LAU Sachsen-Anhalt, Mengen von Zink und Mangan in den Jahren 1999 bis 2012, Lysimeterstation Colbitz.

### 3. Auswertung der Sickerwasseranalysen (Konzentrationen) der 12 Lysimeter für den Zeitraum 1993 bis 2013

- Trendermittlung für die erfassten Nährstoffe wie Nitrat und Ammonium, Phosphor gesamt sowie Sulfat und Chlorid
- Auswertung des Spurenstoffes Aluminium unter dem Gesichtspunkt der Bodenversauerung, ggf. unter Hinzunahme von Eisen und Mangan (Analyse seit April 2009)
- Lässt sich ein Zusammenhang zwischen den Depositionsmessungen und den Sickerwasseranalysen herstellen?

#### 3.1 Messung und Berechnung der Parameter

Seit Juni 1992 erfolgt in Colbitz die Probenahme für die Bestimmung der Beschaffenheit des Sickerwassers einmal monatlich bzw. 12-mal pro Jahr an allen Lysimetern und den Niederschlagssammlern. In niederschlagsarmen Monaten kann es vorkommen, dass der Sickerwasseranfall für eine ausreichende Laborprobe zu gering ist. Im Trockenjahr 2003 fiel beispielsweise an einigen Lysimetern - teilweise über mehrere Monate - nicht genügend Sickerwasser an, um es analytisch auszuwerten (Tabelle 1).

**Tabelle 1:** ungenügender Sickerwasseranfall für Probennahme zur Analyse der Sickerwasserbeschaffenheit am Beispiel des Trockenjahres 2003, Lysimeterstation Colbitz.

Analyse Sickerwasserbeschaffenheit												
	Lysi 1	Lysi 2	Lysi 3	Lysi 4	Lysi 5	Lysi 6	Lysi 7	Lysi 8	Lysi 9	Lysi 10	Lysi 11	Lysi 12
01.01.2003	ja	ja	ja									
01.02.2003	ja	ja	ja									
01.03.2003	ja	ja	ja									
01.04.2003	ja	ja	ja									
01.05.2003	nein	nein	nein									
01.06.2003	nein	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein
01.07.2003	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	nein	nein	ja	nein	nein
01.08.2003	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein
01.09.2003	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein
01.10.2003	nein	ja	nein	nein	nein	nein						
01.11.2003	nein	ja	nein	nein	nein	nein						
01.12.2003	ja	nein	nein	ja	ja							

Das Untersuchungsprogramm beinhaltet die Parameter pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit, Hauptinhaltsstoffe sowie Neben- und Spurenelemente, wie in Tabelle 2 aufgeführt.

Für einen korrekten Vergleich aller Parameter über alle 12 Lysimeter müssten die Mischungskonzentrationen ( $C_{misch}$ ) dieser Parameter für alle Jahre zwischen 1993 und 2012 berechnet werden. Dazu wären neben den monatlichen Konzentrationen ( $C_{mon}$ ) auch die Ablaufmengen ( $Vol_{mon}$ ) nötig gewesen, die monatlich anfielen, um mit folgender Gleichung arbeiten zu können:

$$C_{misch} = \sum \frac{C_{mon} * Vol_{mon}}{Vol_{ges}} \quad \text{mit}$$

$$V_{ges} = \sum Vol_{mon}$$

Aufgrund der Datenlage, die für die Zeit bis Juli 2010 keine zeitlich korrekte Zuordnung von Konzentrationen zu Ablaufvolumina zulässt, konnten nur Jahresmittelkonzentrationen berechnet werden, die nicht ganz akkurat den Mischungskonzentrationen entsprechen, wie sie mit o. g. Funktion ermittelt werden können.

Seit dem Umbau ist es möglich, korrekte Mischungskonzentrationen zu errechnen, hier wird aber aufgrund der angestrebten Vergleichbarkeit der Daten durchgängig mit Durchschnittskonzentrationen gearbeitet.

Besonders beim Anfall von geringen Sickerwassermengen können sich sehr hohe Konzentrationen einstellen (HAGENAU und BORG 2008). Dies gilt für alle hier untersuchten Parameter, mit Ausnahme der Stickstoffparameter, weil diese in der Bodensäule Umsetzungsprozessen unterliegen (MYERS et al. 1982) Es fallen mit den geringen Ablaufmengen aber auch nur kleine Frachten an und der Einfluss dieser Mengen mit hohen Stoffkonzentrationen auf die reelle Mischungskonzentration ist somit sehr klein. Bei der hier - notgedrungen - vorgenommenen Berechnung kommt es also zur Ausgabe von tendenziell zu hohen Werten für alle Konzentrationen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass im Umkehrschluss die Konzentrationen in niederschlagsreichen Jahren zwangsläufig geringer und in niederschlagsarmen Jahren stets höher ausfallen müssen.

**Tabelle 2:** Parameterspektrum der Sickerwasseranalyse, Lysimeterstation Colbitz (Quelle LHW).

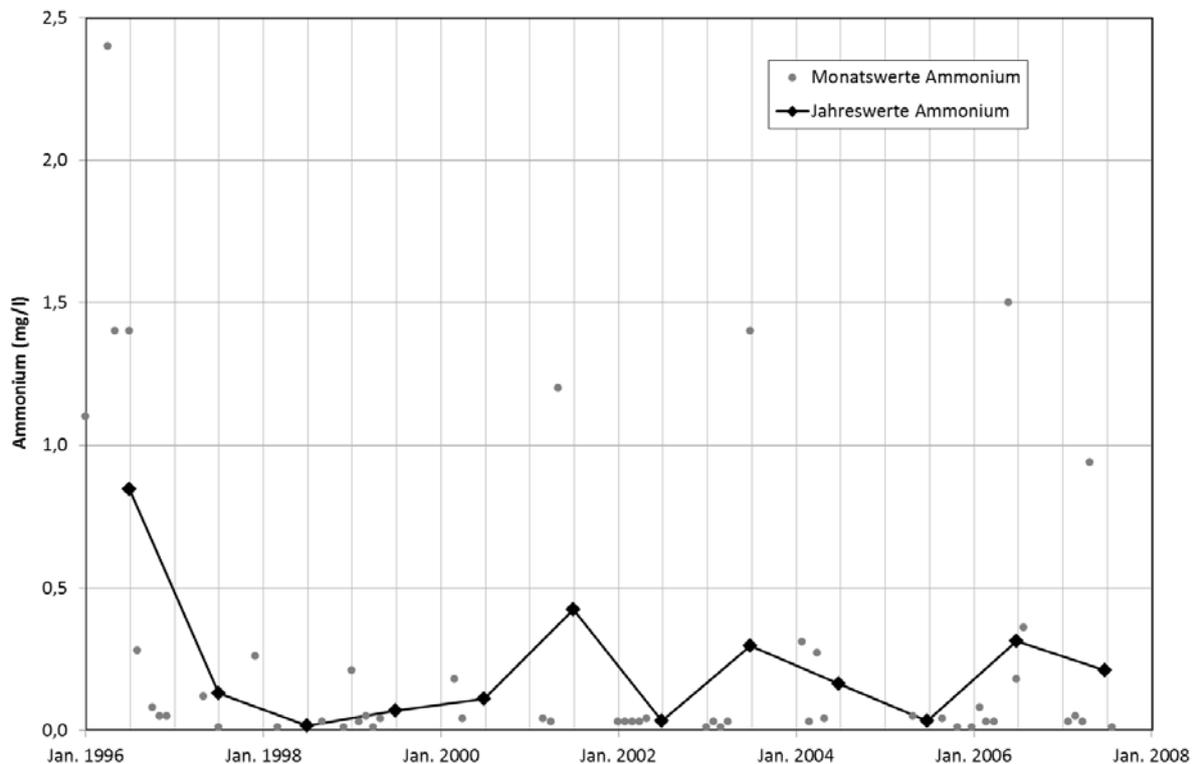
LHW-internes Kürzel	Parameter	Einheit	Analyse-methode	Probennahme-intervall
PH	pH-Wert	-	DIN 38404-C5	1 x monatlich
LF	elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	DIN EN 27888	1 x monatlich
NA	Natrium	mg/l	DIN EN ISO 14911	1 x monatlich
K	Kalium	mg/l	DIN EN ISO 14911	1 x monatlich
MG	Magnesium	mg/l	DIN EN ISO 14911	1 x monatlich
CA	Calcium	mg/l	DIN EN ISO 14911	1 x monatlich
HCO3	Hydrogencarbonat	mg/l	DIN 38405-D8	1 x monatlich
N-MINERAL	Gesamter anorganischer Stickstoff	mg/l		1 x monatlich
NO3	Nitrat	mg/l	DIN EN ISO 10304	1 x monatlich
NO3-N	Nitrat-Stickstoff	mg/l	DIN EN ISO 10304	1 x monatlich
NO2	Nitrit	mg/l	DIN EN ISO 13395	1 x monatlich
NO2-N	Nitrit-Stickstoff	mg/l	DIN EN ISO 13395	1 x monatlich
NH4	Ammonium	mg/l	DIN EN ISO 11732	1 x monatlich
NH4-N	Ammonium-Stickstoff	mg/l	DIN EN ISO 11732	1 x monatlich
P	Phosphor-gesamt	mg/l	DIN EN ISO 6878	1 x monatlich
SO4	Sulfat	mg/l	DIN EN ISO 10304	1 x monatlich
CL	Chlorid	mg/l	DIN EN ISO 10304	1 x monatlich
KS 4,3	Säurekapazität (4.3)	mmol/l	DIN 38409-H7	1 x monatlich
GES HAERT	Gesamthärte	°dH	DIN 38409-H6	1 x monatlich
HAERTE	Summe Ca+Mg	mmol/l		1 x monatlich
AL	Aluminium	µg/l	DIN EN ISO 11885	1 x monatlich
MN	Mangan	µg/l	DIN EN ISO 11885	1 x monatlich
FE	Eisen	µg/l	DIN EN ISO 11885	1 x monatlich

Die Werte für einige Parameter sind lückenhaft vorhanden. Gründe hierfür sind beispielsweise:

- Kein oder geringer Niederschlag → quantitativ unzureichende Sickerwasserprobe (häufigster Fall).
- technische Umbaumaßnahmen bspw. im Frühjahr 1996 und Reparaturen bspw. im November 1997.
- personelle Kapazitätsgrenzen im Labor bei außergewöhnlichen Ereignissen wie bspw. bei Hochwasser.

Daneben waren Parameter teilweise nicht bestimmbar, da ihr Wert unterhalb der Bestimmungsgrenze der angewendeten Analyseverfahren lag. Wenn dies über das ganze Jahr der Fall war, konnten keine durchschnittlichen Jahreswerte ermittelt und dargestellt werden. In den Abbildungen liegen dann Lücken vor. Abbildung 17 zeigt zunächst den Verlauf der Monatswerte sowie die durchschnittlichen Jahreswerte für Ammonium im Sickerwasser von Lysimeter 10 in den 12 Jahren von 1996 bis 2007. Hier ist zum Einen die breite Streuung der Monatswerte innerhalb der einzelnen Jahre erkennbar.

Andererseits wird deutlich, dass nicht für alle Jahre vollständige Monatswerte vorliegen. Wegen der besseren Übersichtlichkeit wurde ein Ausschnitt von 12 Jahren gewählt.



**Abbildung 17:** Konzentrationen von Ammonium in den Jahren 1996 bis 2007 im Sickerwasser von Lysimeter 10, Lysimeterstation Colbitz.

Eine gezielte Auswertung der Konzentrationen von Eisen war aufgrund der erst seit 2009 stattfindenden Analysen zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht zweckmäßig. Bei den meisten Lysimetern lagen zudem die Analysen für Eisen unterhalb der Bestimmungsgrenze von  $<50 \mu\text{g/l}$ . Jedoch treten bei den Lysimetern 9 und 10 mehr oder minder kontinuierlich Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze und kleiner  $1 \text{ mg/l}$  auf. Eine konkrete Erklärung dafür kann zu diesem Zeitpunkt nicht gegeben werden.

### 3.2 Trendermittlung für die erfassten Stoffe

Die Jahresmittelkonzentrationen für alle relevanten Parameter wurden für jedes Jahr im Untersuchungszeitraum von 1993 bis 2013 für jedes Lysimeter berechnet (Mittelwertbildung aus den monatlichen Konzentrationen eines jeden Stoffes) und sind im Folgenden in Diagrammen für jeden einzelnen Stoff dargestellt.

Da sich die Darstellung von Konzentrationsverläufen von 12 Lysimetern über 21 Jahre zum Einen als sehr unübersichtlich erwies und zum Anderen außer beim Sulfat kaum Trends sichtbar sind, wurde für jeden Parameter noch eine weitere Abbildung angefertigt: In diesen Abbildungen (Abb. 19, 21, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36 und 38) sind die Jahresmittelkonzentrationen nochmals zu Durchschnittswerten zusammengefasst. Zu Durchschnittswerten für die drei unterschiedlichen Boden- und Bewirtschaftungstypen, nach denen sich die 12 Lysimeter aufteilen lassen. So bilden die Lysimeter 1 bis 6 eine Gruppe, ebenso die Lysimeter 7 bis 9 und 10 bis 12. Eine genaue Beschreibung der Bodenarten und Bepflanzung der 12 Lysimeter ist in Kapitel 1 bzw. in Kapitel 6 zu finden.

### 3.3 Auswertung der Stoffkonzentrationen und Zusammenhang mit Depositionsmessungen

Die Abbildungen 18 bis 37 zeigen die Konzentrationsverläufe für 10 verschiedene Stoffe bzw. Stoffgruppen jeweils für alle 12 Lysimeter sowie als Durchschnittswerte für drei Gruppen, in denen Lysimeter zusammengefasst wurden. Mit Ausnahme von Abbildung 34 und Abbildung 35 für Mangan, wo Daten ab 2009 vorliegen, erfolgt die Darstellung jeweils für den Zeitraum 1993 bis 2013.

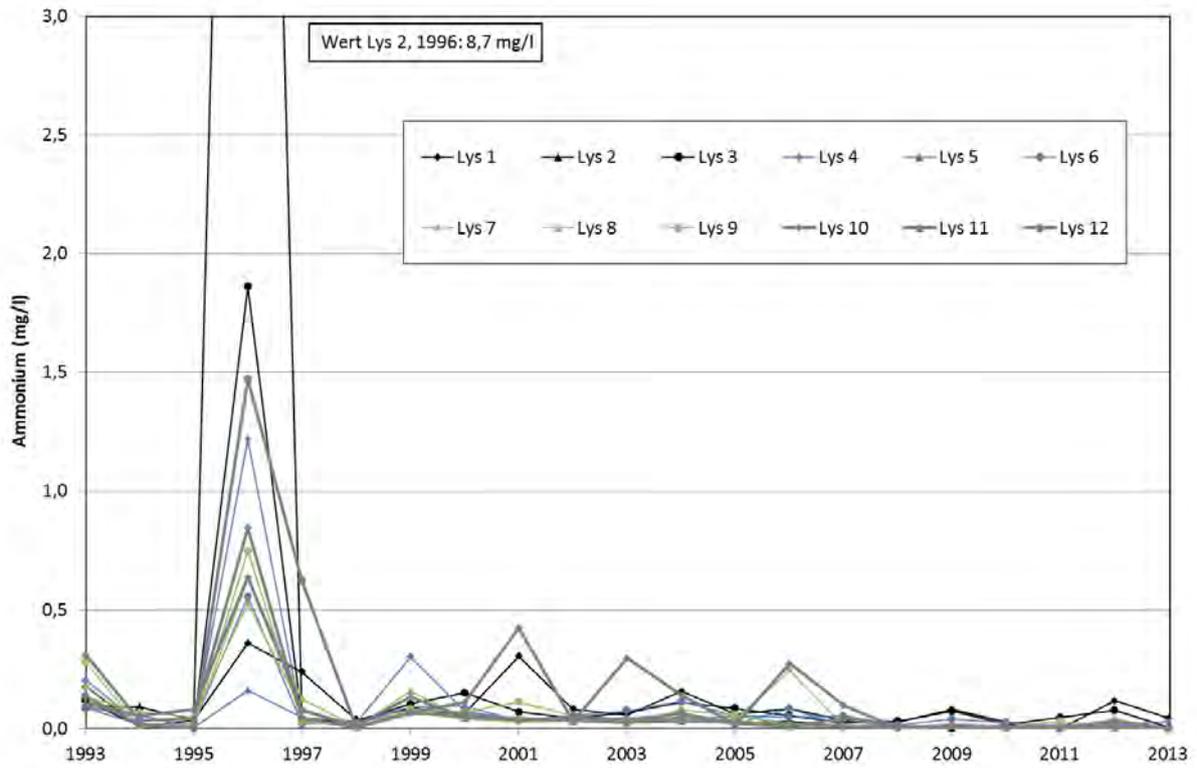
Im Folgenden wird auf alle Stoffe bzw. Stoffgruppen näher eingegangen. Da sich die Lysimeter in einem Trinkwasserschutzgebiet befinden, bietet sich für die Interpretation der Vergleich mit den Grenzwerten der „Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch“ (TrinkwV, BMJ 2001) an. In diesem Zusammenhang ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung für Trinkwasser gelten, nicht für Sickerwasser. Sie können im Grundwasser- und Sickerwasserbereich als „Richtgröße“ zum Nachweis anthropogener und/oder geogener Belastungen fungieren. Für genauere Interpretationen empfiehlt sich aber ein Vergleich mit Hintergrundwerten, die vom Ausgangssubstrat abhängen (SCHLEYER und KERNDORFF, 1992).

#### **Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) und Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) (Abbildungen 18 bis 21)**

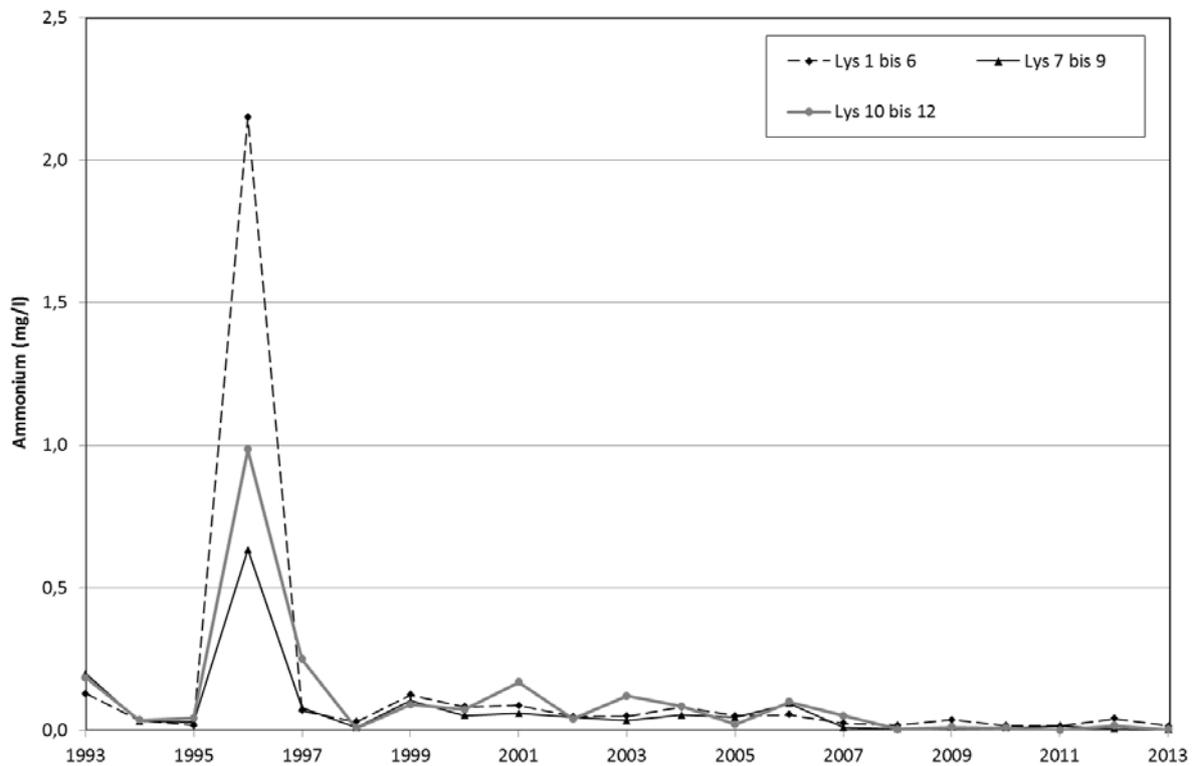
Bei Ammonium gab es im Jahre 1996 Konzentrationen, die in 10 der 12 Lysimeter über dem Grenzwert der TrinkwV in Höhe von 0,5 mg/l lagen. Die hohen Werte traten dabei in allen Gruppen auf, besonders aber in den Lysimetern eins bis sechs. Die extrem hohen Werte (in Lysimeter 2 sind es 34 mg/l bzw. 28 mg/l im Juli und August) könnten mit dem finalen Umbau der Ablaufeinrichtungen in Verbindung stehen. Von der Inbetriebnahme der Lysimeterstation 1968 bis zum 27. Juni 1994 wurde die Sickerwassermenge dekadenweise ermittelt. Dies geschah über das Ablassen des Sickerwassers an einem Ablaufhahn, welcher sich an der Seite ca. 10 cm über dem Lysimeterboden befand. Um dem Rückstau von Sickerwasser im unteren Lysimeterabschnitt entgegenzuwirken, wurden vom 28. Juni bis 30. Juni 1994 alle Lysimeter umgebaut. Hierfür wurde an den Böden der Lysimetergefäße eine Austrittsöffnung geschaffen (UFZ 1995). Die unerwünschten Effekte wurden somit unterbunden, jedoch war eine Konsolidierungsphase von einem Jahr erforderlich.

1995 wurden daneben Undichtigkeiten an einzelnen Lysimetergefäßen festgestellt, so dass von Dezember 1995 bis März 1996 umfassende Umbaumaßnahmen durchgeführt wurden (UFZ 1996). Im Rahmen dieser Arbeiten wurde die Sickerwasserablauf-einrichtung endgültig so umgebaut, dass das Sickerwasser allein der Gravitation folgend am Lysimeterboden austritt und die Sickerwassermenge mittels Kippwaagen registriert wird.

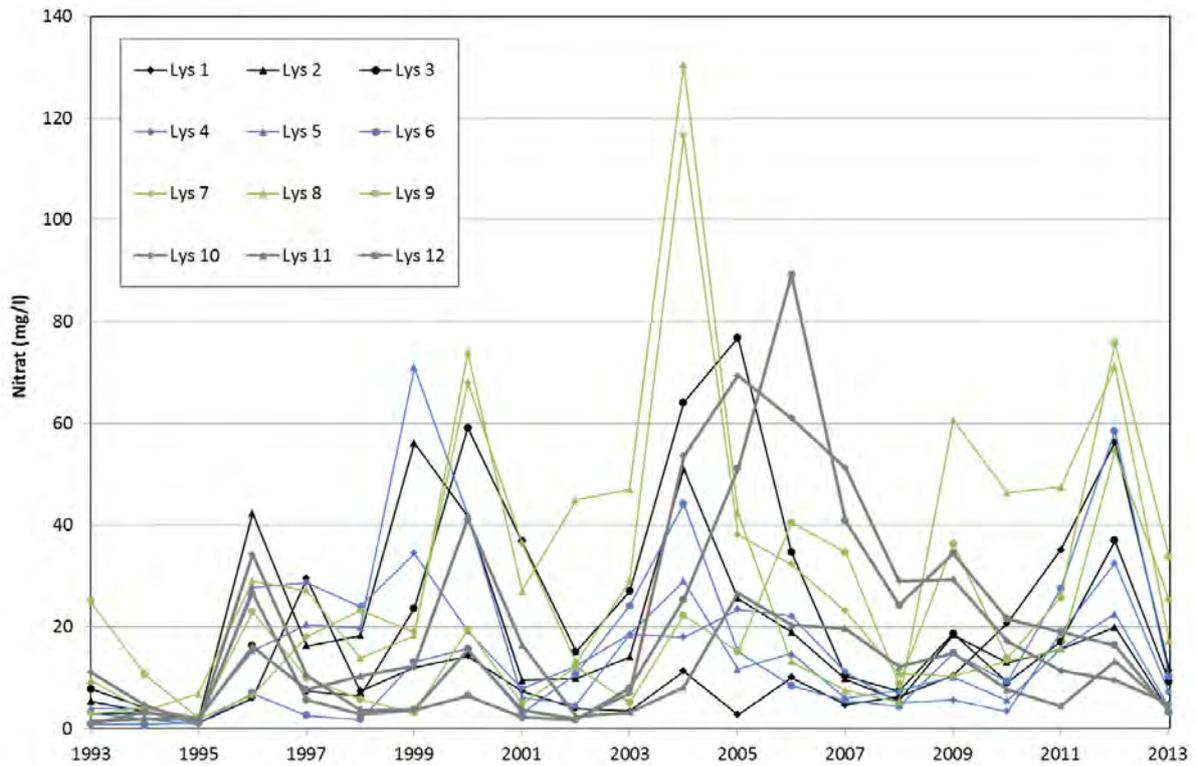
Mögliche Veränderungen des Milieus in den Monaten nach der Wiederinbetriebnahme können deshalb nicht ausgeschlossen werden. Weiterhin ist anzumerken, dass es sich um ein trockenes Jahr mit nur 519 mm Niederschlag handelte, in dem nur viermal eine Beprobung erfolgen konnte. In den anderen Jahren gab es keinerlei Auffälligkeiten.



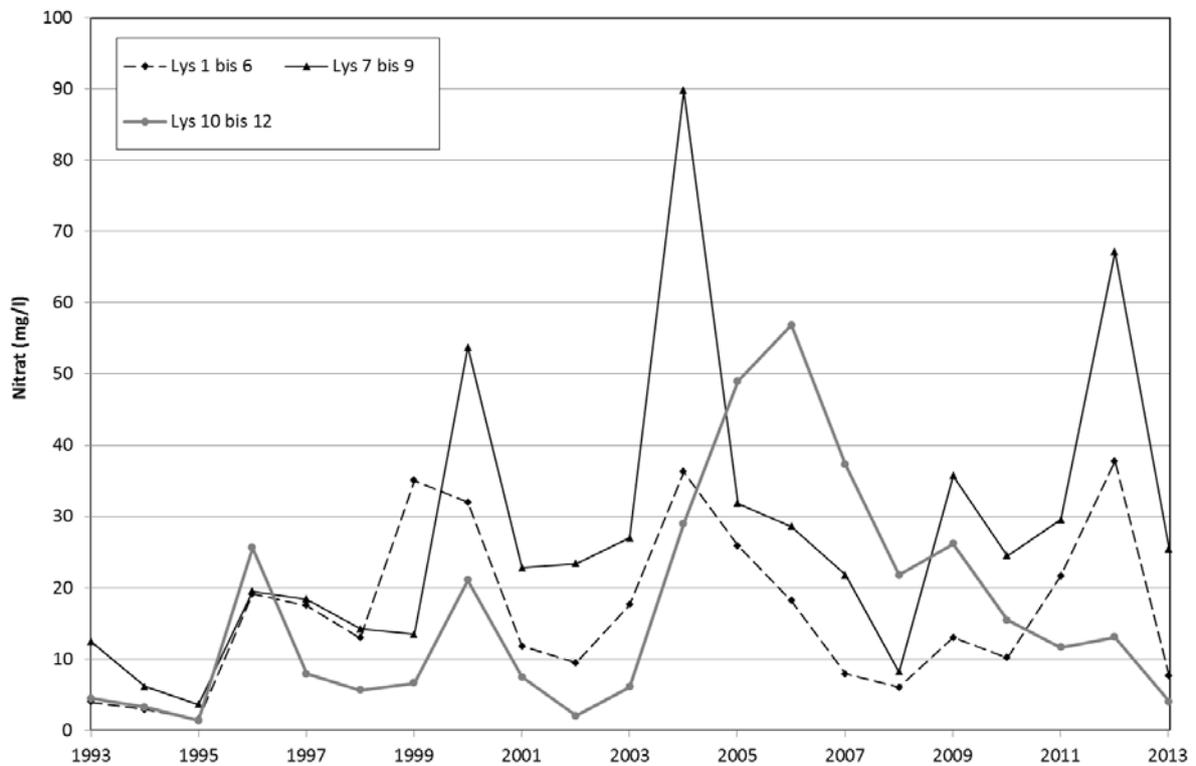
**Abbildung 18:** Durchschnittliche Konzentrationen von Ammonium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 19:** Durchschnittliche Konzentrationen von Ammonium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 20:** Durchschnittliche Konzentrationen von Nitrat in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.

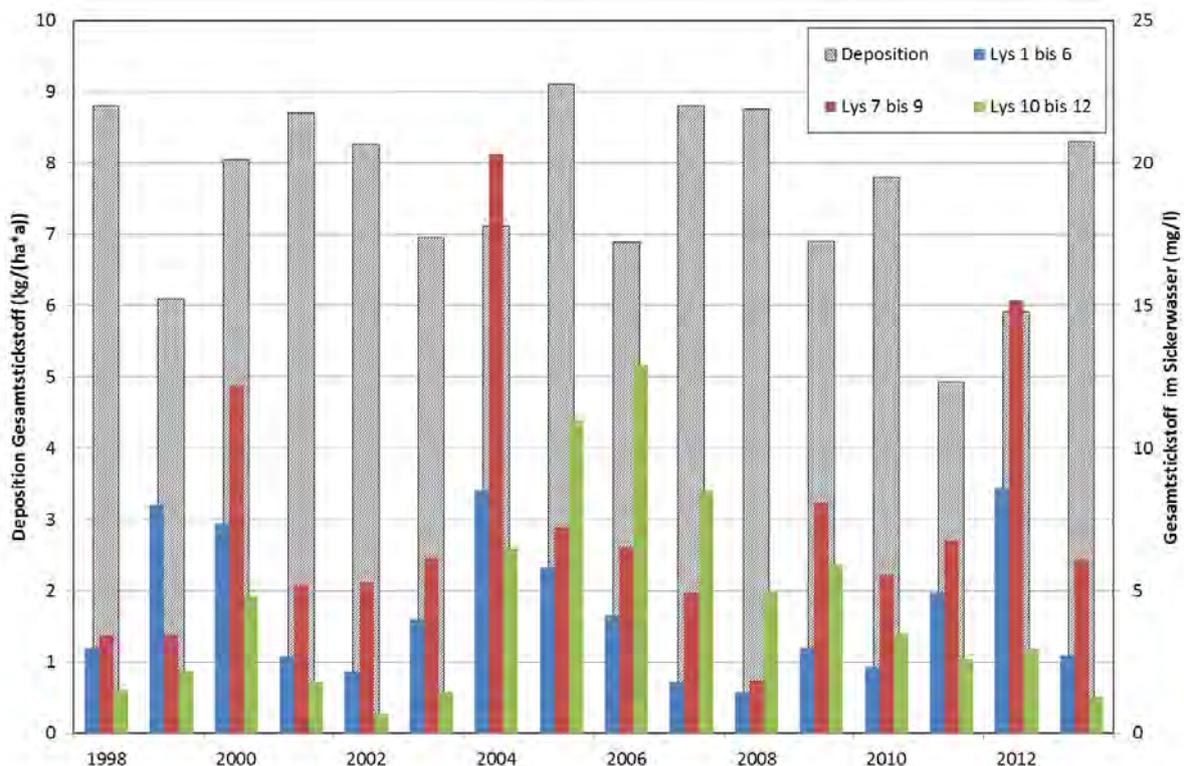


**Abbildung 21:** Durchschnittliche Konzentrationen von Nitrat in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz.

Bei Nitrat gab es in 7 der beobachteten 20 Jahre Überschreitungen des Grenzwertes der TrinkwV, der bei 50 mg/l liegt. Diese hohen Werte traten dabei stets gruppenübergreifend auf, in den Jahren 2004 und 2012 sogar bei jeweils 5 Lysimetern. Tendenziell sind die Werte in der Gruppe Lysimeter 7 bis 9 am höchsten, dennoch ist keine Systematik erkennbar.

Einen Vergleich mit den Depositionsdaten zeigt Abbildung 22. Dem in Colbitz deponierten Gesamtstickstoff sind die Konzentrationen der drei Lysimetergruppen an Gesamtstickstoff gegenübergestellt. Alle Werte sind hier in Säulen abgebildet. Da die Depositionsdaten erst ab 1998 vorliegen, erfolgt die Darstellung auch ab diesem Jahr. In den folgenden Jahren lässt sich keinerlei Einfluss von Deposition auf das Sickerwasser erkennen. Auch nicht mit einem Versatz von ein oder zwei Jahren.

Bei einer Deposition von 7 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr ergibt sich pro Lysimeter (mit einer Grundfläche von 1 m<sup>2</sup>) ein Eintrag von 700 mg. Bei einer jährlichen Ablaufmenge von durchschnittlich etwa 250 l mit einer durchschnittlichen Konzentration von etwa 10 mg/l wird jedoch die drei- bis vierfache Menge des deponierten Stickstoffes ausgewaschen. Dies ist nicht ungewöhnlich. Der Frage, welche Rolle Substrat, Laub oder andere Faktoren für die Stickstofflieferung spielen, sollte jedoch nachgegangen werden.



**Abbildung 22:** Gesamtstickstoff: atmosphärische Deposition sowie durchschnittliche Konzentrationen im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, in den Jahren 1998 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz.

**Phosphor gesamt, Chlorid (Cl<sup>-</sup>) und Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)** (Abbildungen 23 bis 28)

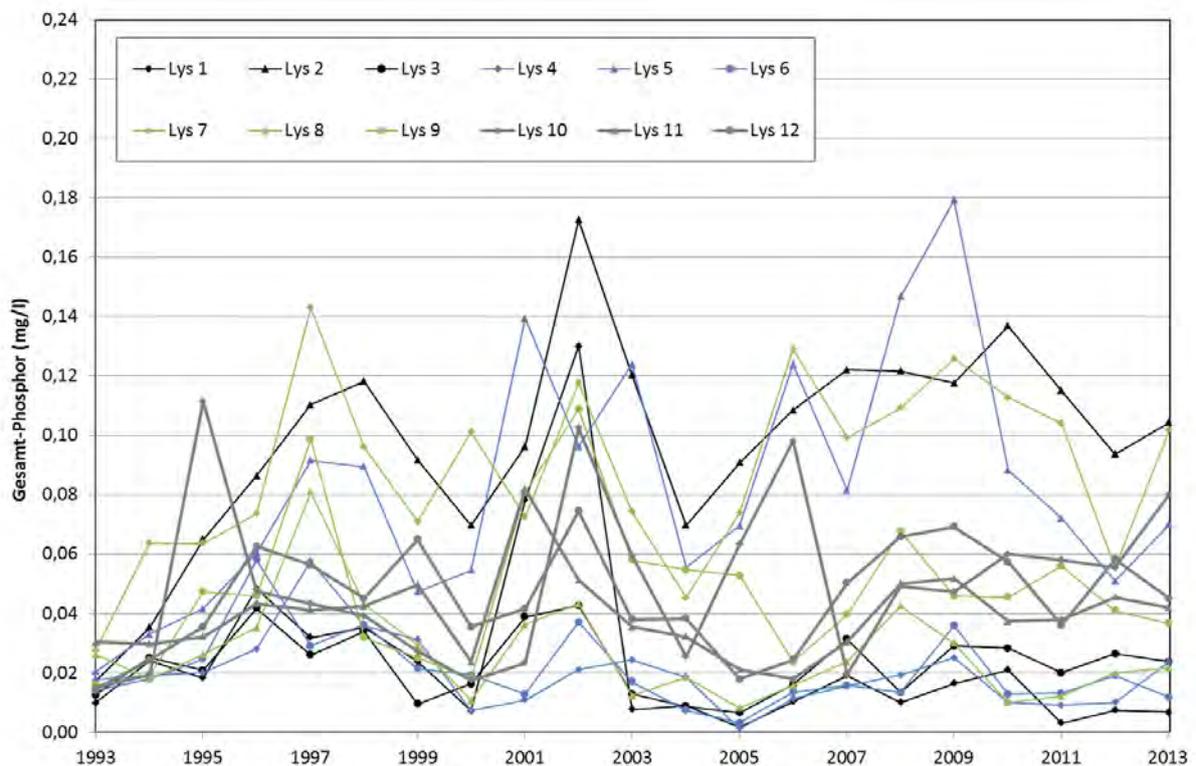
Bei allen Parametern wurden die Grenzwerte der TrinkwV (Sulfat und Chlorid je 250 mg/l; Phosphat ehemals 6,7 mg/l, entspricht 2,2 mg/l Phosphat-Phosphor, momentan kein Grenzwert vorgegeben, (novellierte TrinkwV, BMJ 2011)) stets deutlich

unterschritten. Während bei Phosphor (Abbildungen 23 und 24) und Chlorid (Abbildungen 25 und 26) ähnliche, schwierig zu interpretierende, Schwankungen über alle Gruppen wie bei Nitrat auftraten, ist Sulfat (Abbildungen 27 und 28) der einzige Parameter im gesamten Spektrum, bei dem ein deutlicher Trend ersichtlich ist: Über alle Lysimeter(gruppen) sind die Konzentrationen in den letzten 20 Jahren kontinuierlich zurückgegangen, was auch sehr gut mit den Ergebnissen der Depositionsmessungen (Kapitel 2) korrespondiert.

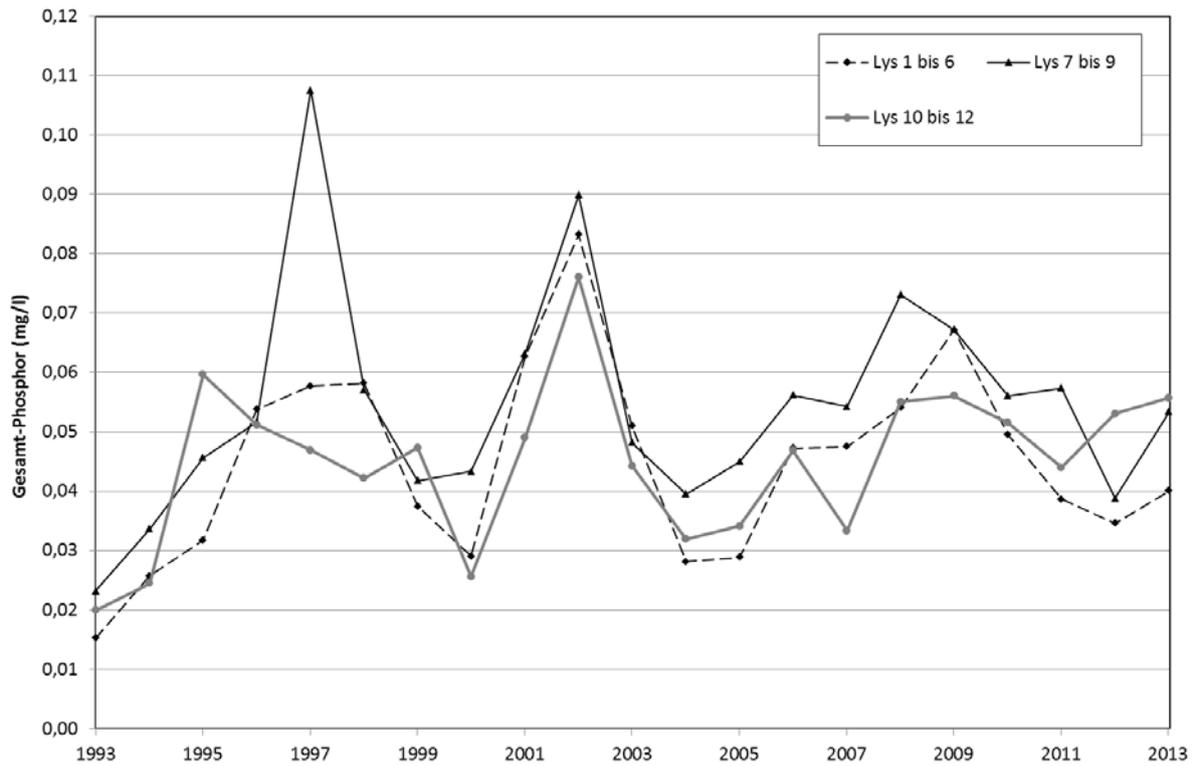
Vom Phosphor gerät, im Gegensatz zum Nitrat, nur ein Bruchteil ins Sickerwasser. Direkte Zusammenhänge zwischen Deposition und Sickerwasseranfall können hier nicht gezeigt werden, da bei der Deposition nur Hydrogenphosphat erfasst wird. Jedoch sind nach Jahren mit höherem Eintrag von Hydrogenphosphat (2000 und 2007) in den Folgejahren erhöhte Werte von Gesamtphosphor in allen Gruppen sichtbar. Die hohen Phosphorkonzentrationen im Jahr 2013 lassen sich aber nicht mit den Depositionsdaten erklären.

Eine kleine Besonderheit fällt auf, die eventuell mit der Neubepflanzung der Lysimeter im Jahre 2011 zusammenhängt: Der Abwärtstrend beim Sulfat setzt sich bei den Lysimetern 10 bis 12 im Gegensatz zu allen anderen Lysimetern - allerdings schon ab 2009 - nicht mehr fort. Demnach sollte der Frage nachgegangen werden, ob *Calamagrostis epigejos* und *Calluna vulgaris* Unterschiede im Schwefelhaushalt aufweisen.

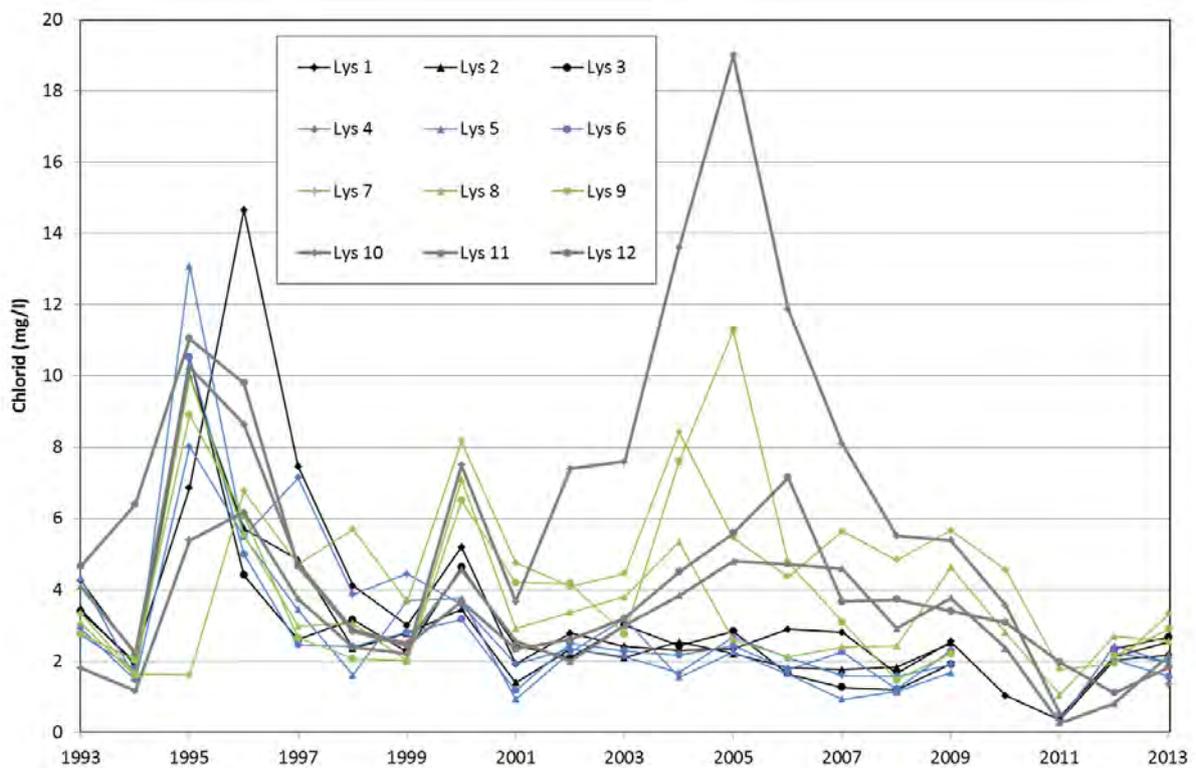
Allgemein sei an dieser Stelle bereits angemerkt, dass sich die Auswirkungen der Neubepflanzung auf das Sickerwasser erst in den nächsten Jahren manifestieren werden. Fundierte Aussagen können erst nach weiteren Jahren sorgfältiger Sickerwasserbeprobung getroffen werden.



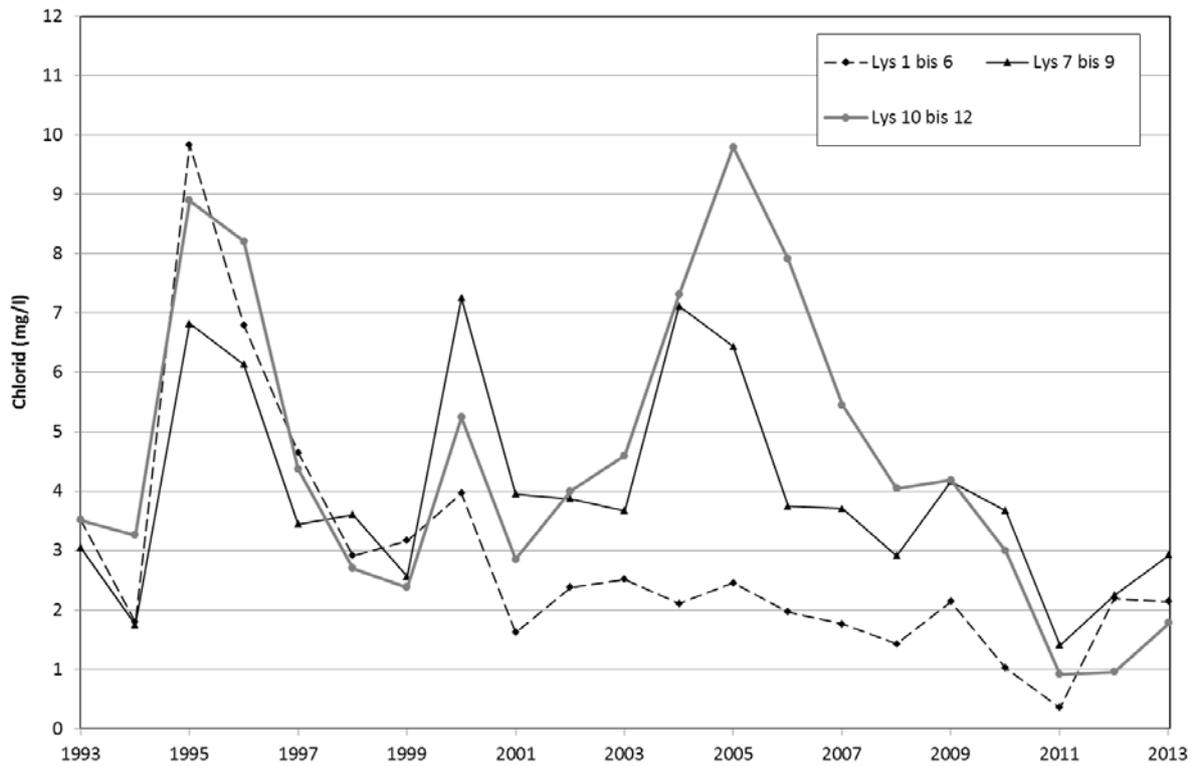
**Abbildung 23:** Durchschnittliche Konzentrationen von Phosphor in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.



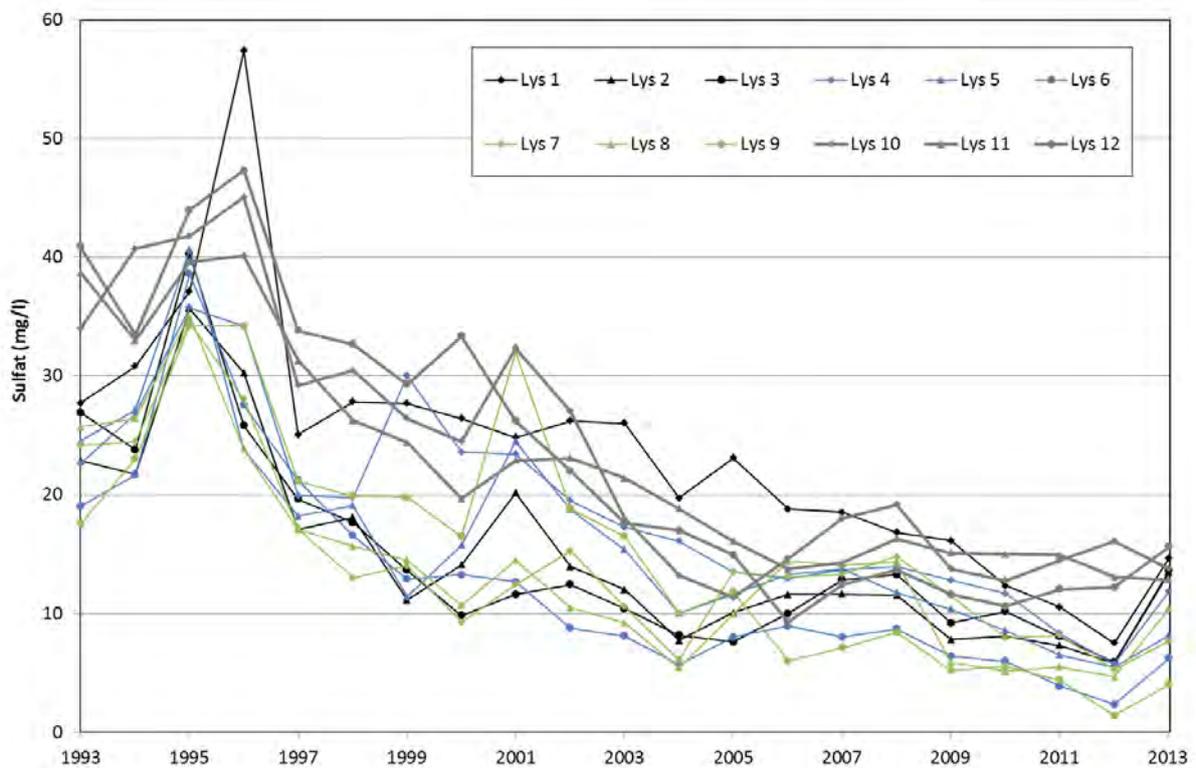
**Abbildung 24:** Durchschnittliche Konzentrationen von Phosphor in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz.



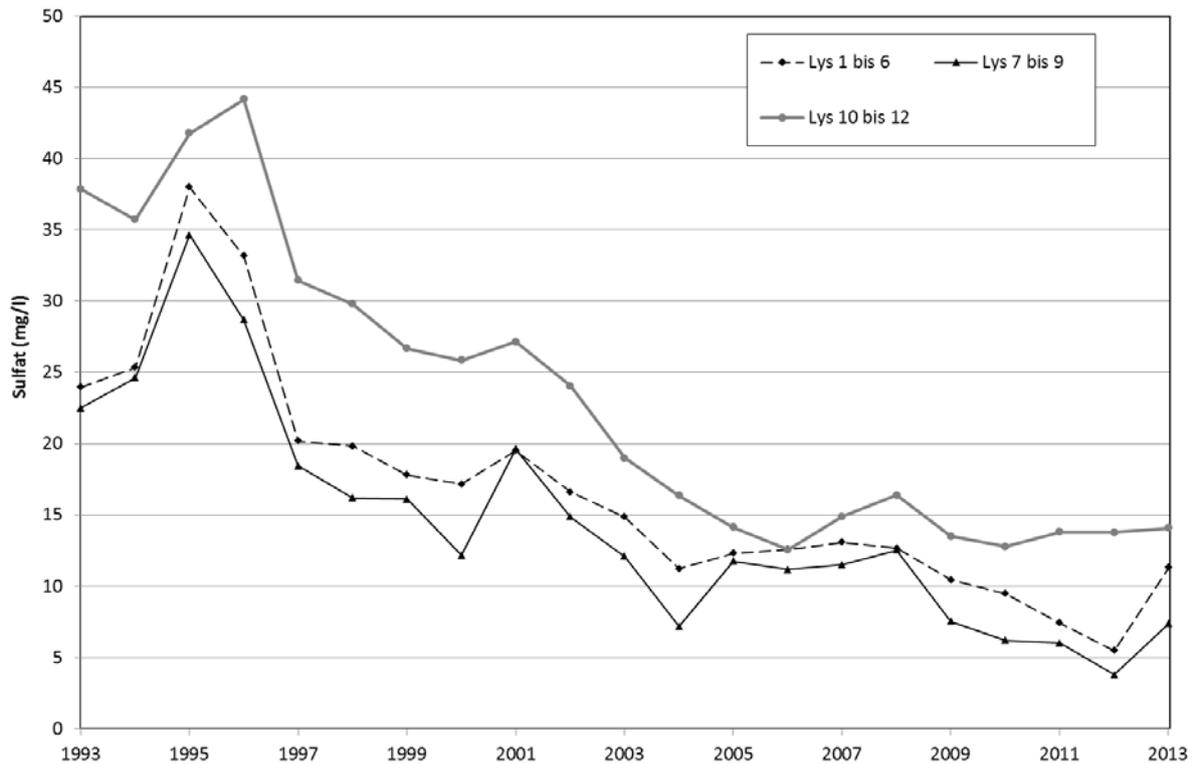
**Abbildung 25:** Durchschnittliche Konzentrationen von Chlorid in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 26:** Durchschnittliche Konzentrationen von Chlorid in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 27:** Durchschnittliche Konzentrationen von Sulfat in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 28:** Durchschnittliche Konzentrationen von Sulfat in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz.

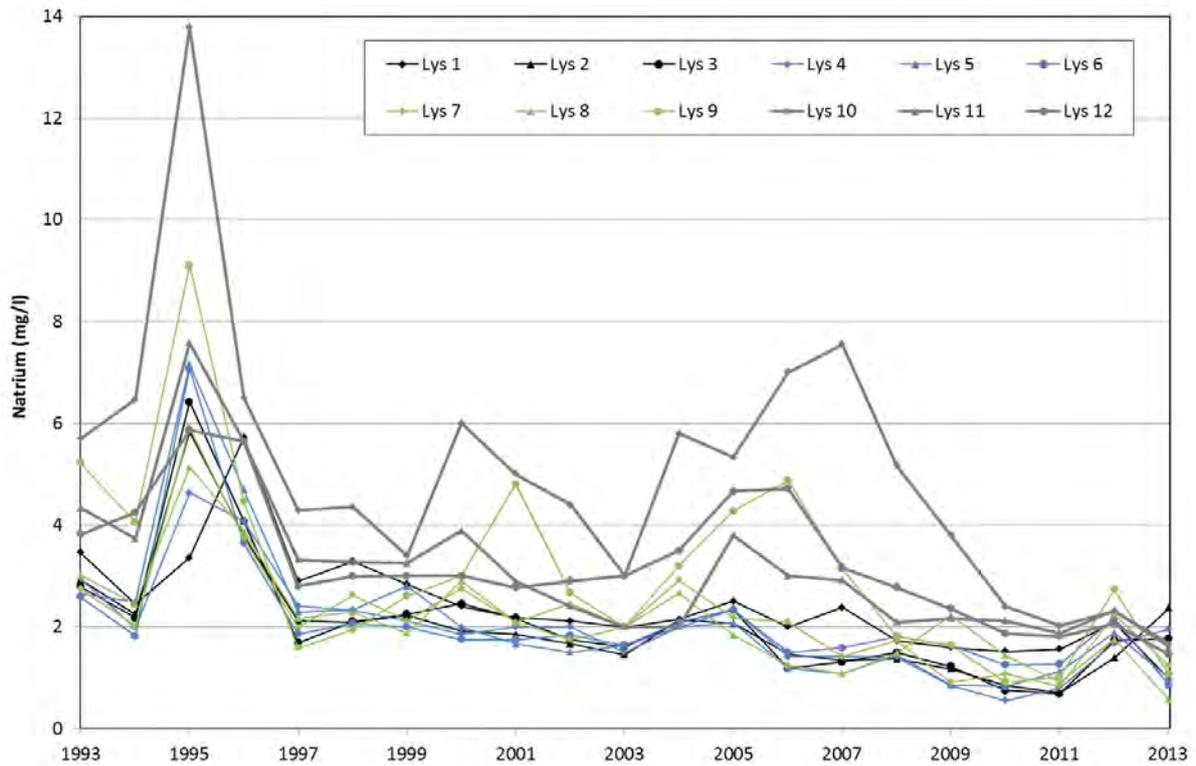
### Kationen (Abbildungen 29 bis 34)

Bei allen Parametern wurden die (teils inzwischen gestrichenen) Grenzwerte der TrinkwV (BMJ 2011) stets deutlich unterschritten. Bei den Schwankungen über alle Gruppen ist wiederum keine Systematik erkennbar.

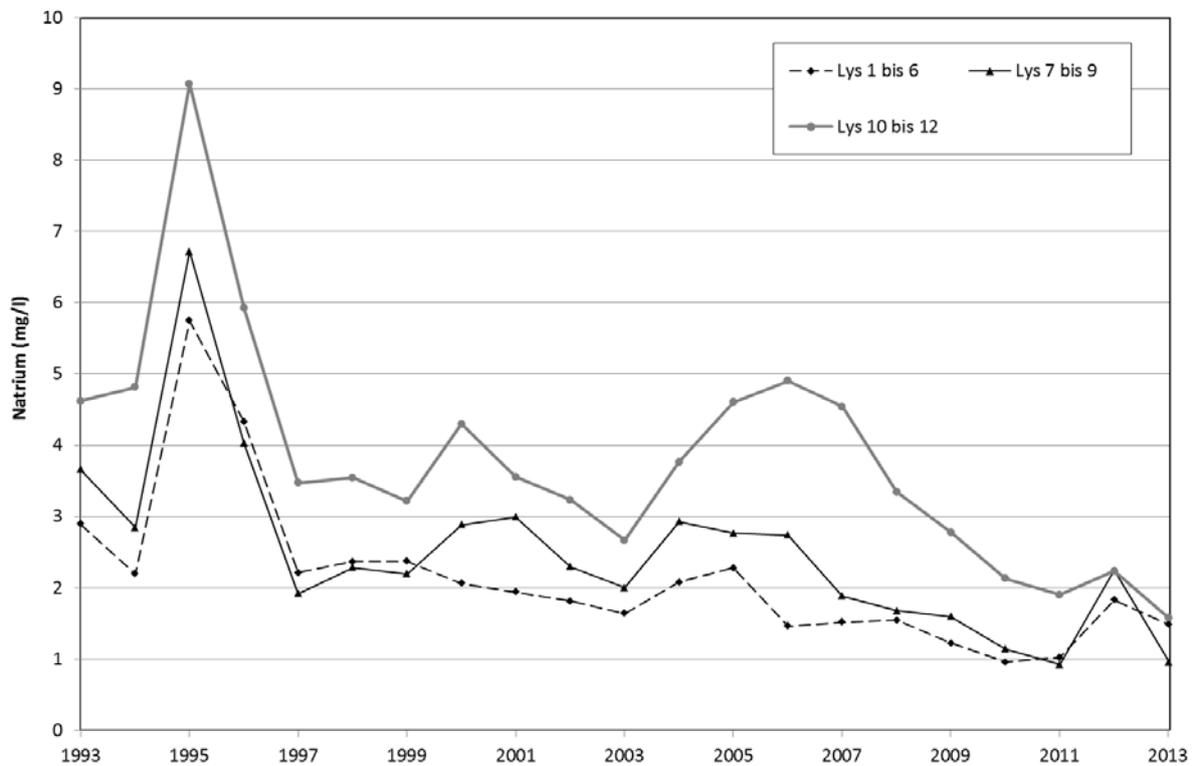
Während die höchsten Konzentrationen an Natrium (Abbildungen 29 und 30) in den Lysimetern 10 bis 12 auftreten, finden sich die höchsten Werte für Kalium (Abbildungen 31 und 32) durchgängig in den Lysimetern 7 bis 9. Eine auffällige Spitze der Natriumkonzentration in nahezu allen Lysimetern findet sich im Jahr 1995.

Obwohl die Konzentrationen von Natrium, Kalium sowie Magnesium und Calcium über die Jahre und über alle Gruppen hinweg ähnlich stark schwanken wie die anderen Parameter, sind hier Trends zu erkennen: Natrium nimmt generell ab während sich die Kaliumwerte insgesamt geringfügig erhöhen. Diese Trends korrespondieren mit den Ergebnissen der Depositionsmessungen (vgl. Abb. 8).

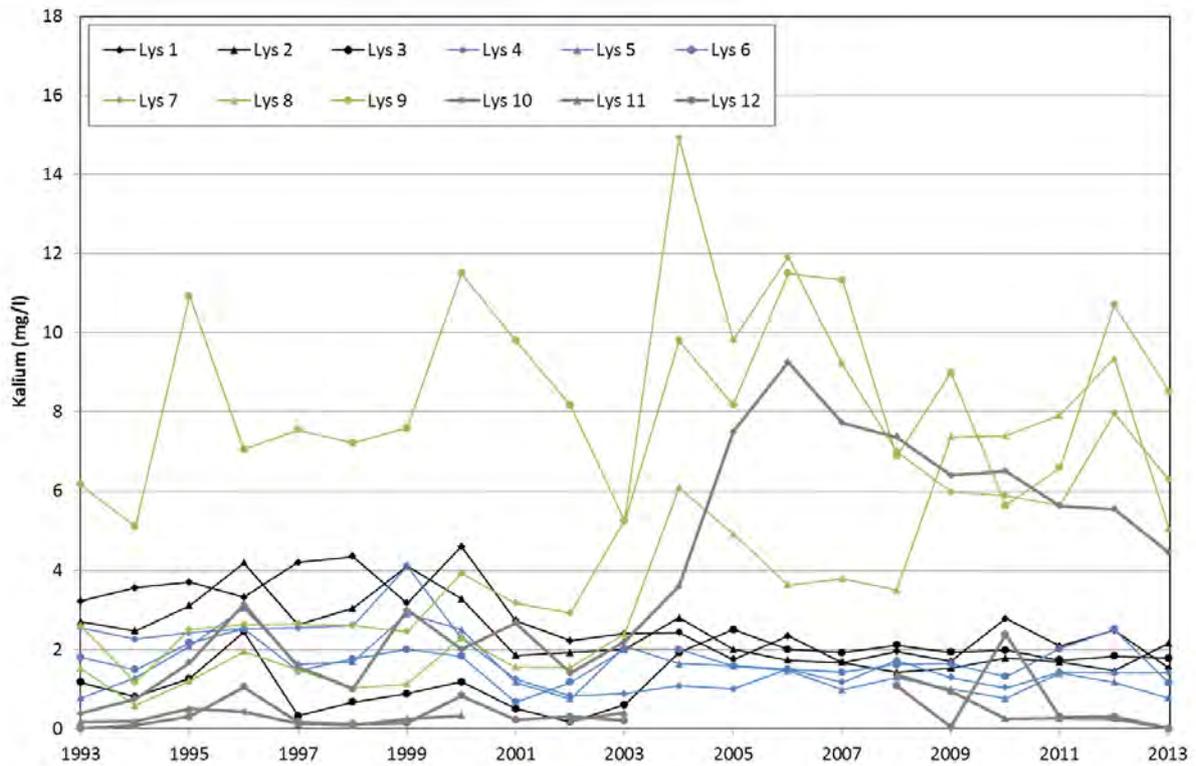
Magnesium und Calcium und damit die Härte des Wassers (Abbildungen 33 und 34) haben in den letzten Jahren leicht abgenommen, wobei sich ein Härtegrad zwischen 0,1 und 0,6 mmol/l (entspricht 0,56 bis 3,37 °dH) in allen Gruppen eingestellt hat. Das Wasser ist deshalb als sehr weich zu charakterisieren.



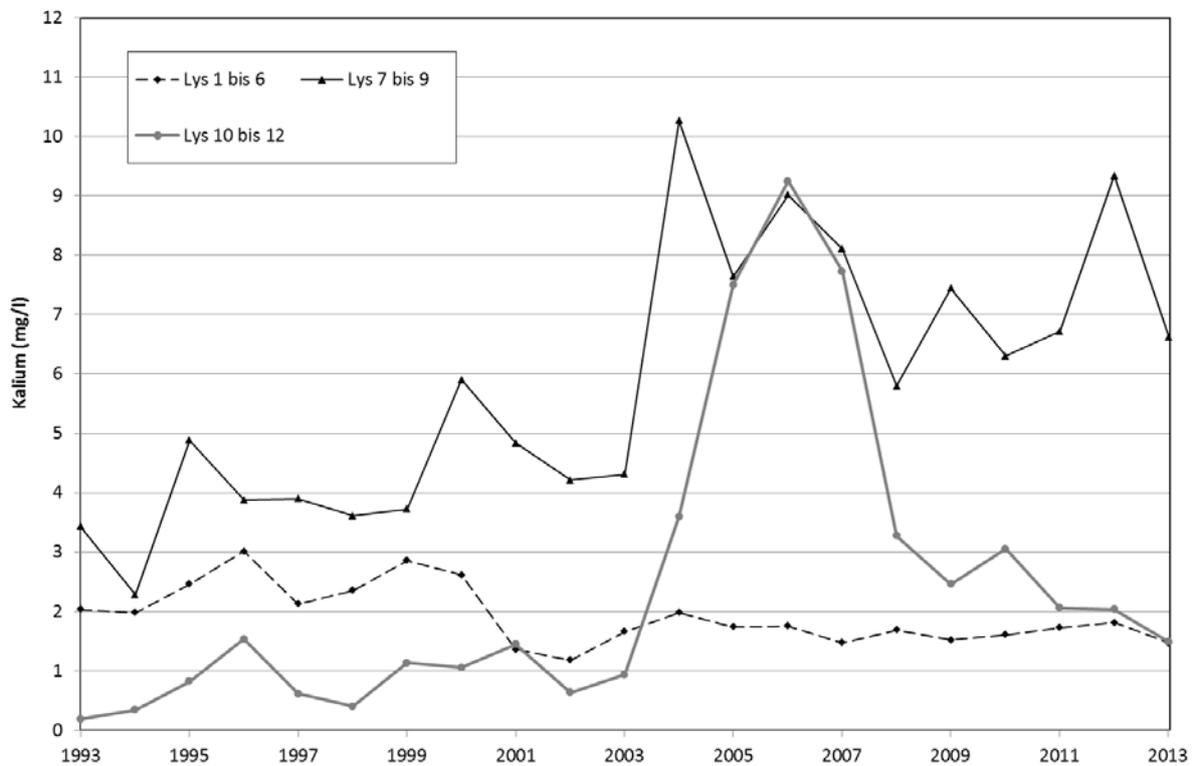
**Abbildung 29:** Durchschnittliche Konzentrationen von Natrium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.



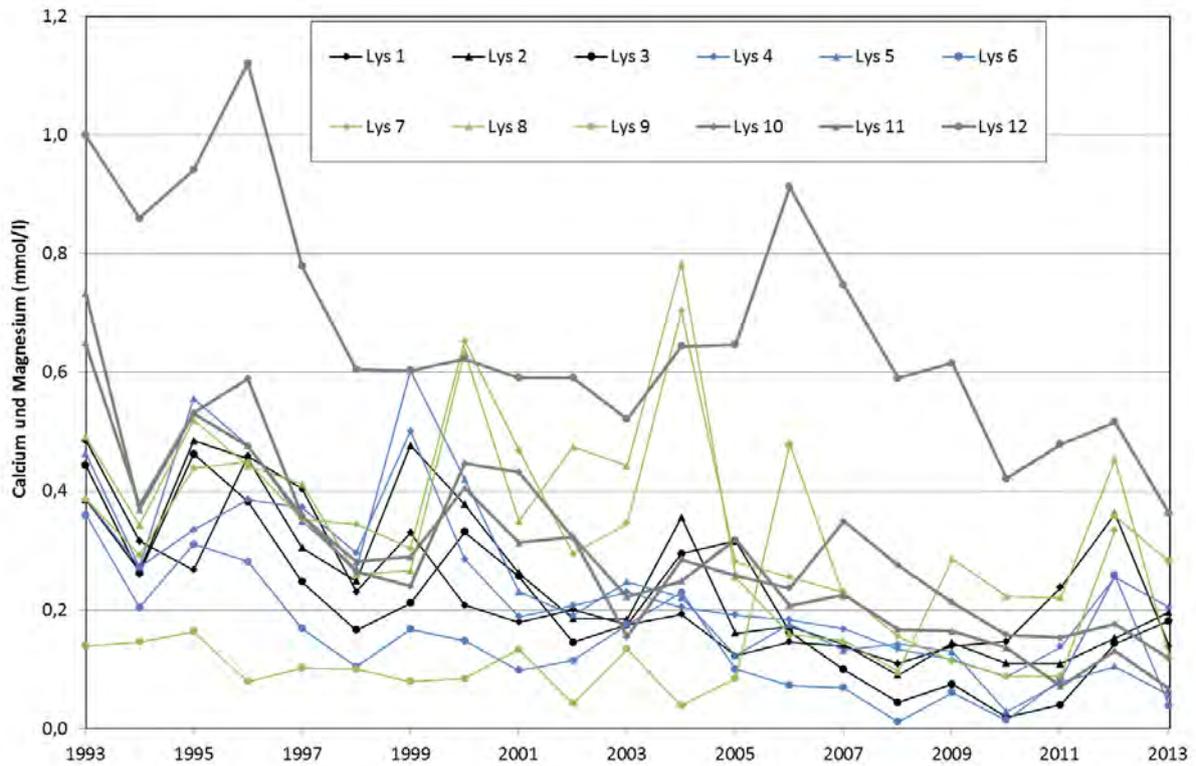
**Abbildung 30:** Durchschnittliche Konzentrationen von Natrium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz.



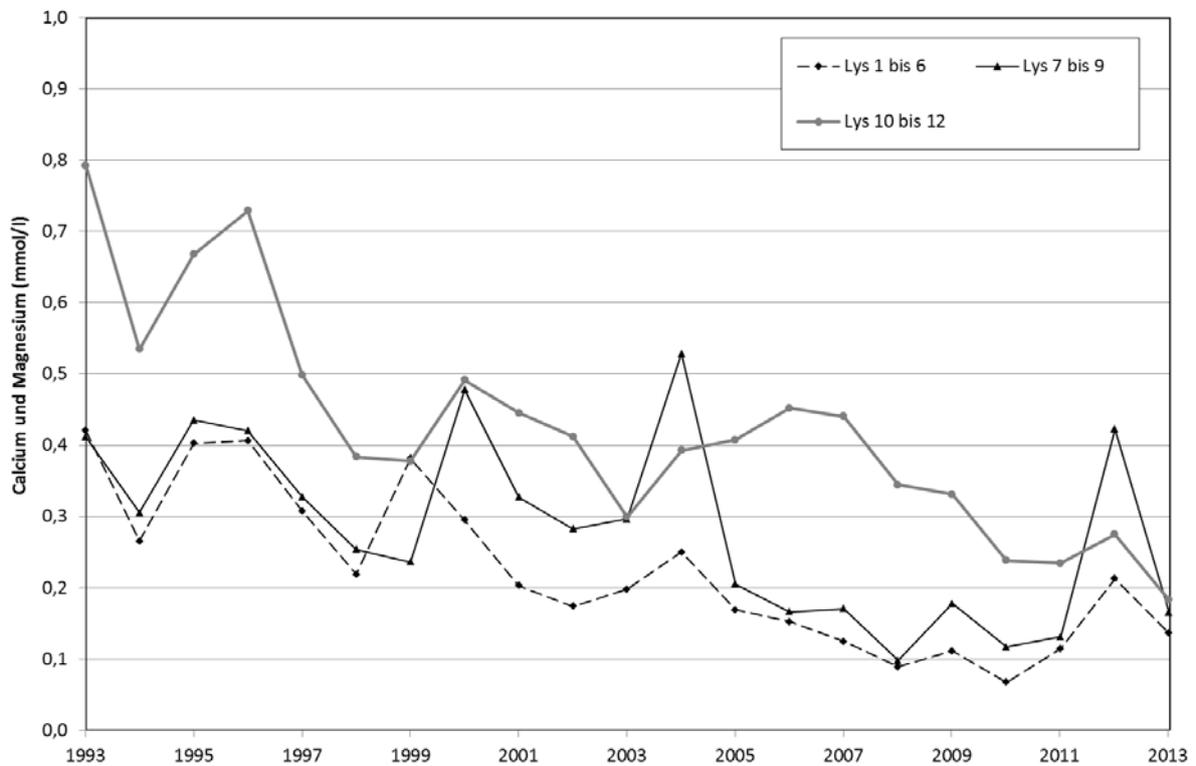
**Abbildung 31:** Durchschnittliche Konzentrationen von Kalium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 32:** Durchschnittliche Konzentrationen von Kalium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 33:** Durchschnittliche Gesamthärte des Sickerwassers der 12 Lysimeter in den Jahren 1993 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 34:** Durchschnittliche Gesamthärte des Sickerwassers, gemittelt für drei Lysimetergruppen in den Jahren 1993 bis 2013, Lysimeterstation Colbitz.

### **Mangan (gesamt) und Aluminium (gesamt)** (Abbildungen 35 bis 38)

Bei beiden Parametern werden die Grenzwerte der TrinkwV fast ständig überschritten, und das teilweise sehr deutlich. Mangan (Abbildungen 35 und 36) zeigt ein ähnlich komplexes geochemisches Verhalten wie Eisen. Im Grundwasser werden viele Reaktionen durch die Eh/pH-Bedingungen und durch mikrobielle Aktivitäten bestimmt, so das Mangan im Grundwasser meist nur in Spuren enthalten ist. Selbst unter reduzierenden Bedingungen steigt die Konzentration von Mangan nur bis etwa 1 mg/l an. Im Lockergesteinsbereich wie bspw. der Colbitz-Letzlinger Heide liegt der geogene Normalbereich im Grundwasser zwischen  $< 0,01$  und  $0,3$  mg/l (SCHLEYER und KERNDORFF 1992).

Die Löslichkeit von Aluminium (Abbildungen 37 und 38) in Boden und Grundwasser wiederum hängt neben der Verfügbarkeit von organischen Komplexbildnern deutlich vom pH-Wert ab. Ohne anthropogene Einflüsse liegen im Grundwasser generell sehr geringe Al-Konzentrationen vor, meist im Zehner bis Hunderter  $\mu\text{g/l}$ -Bereich. Aluminium (als  $\text{Al}^{3+}$ ) tritt in Lockergesteinen geogen in einem Konzentrationsbereich von  $< 0,01$  mg/l bis  $0,04$  mg/l auf (SCHLEYER und KERNDORFF 1992). Den Beginn anthropogener Beeinflussung sehen Schleyer und Kerndorff ab  $0,1$  mg/l.

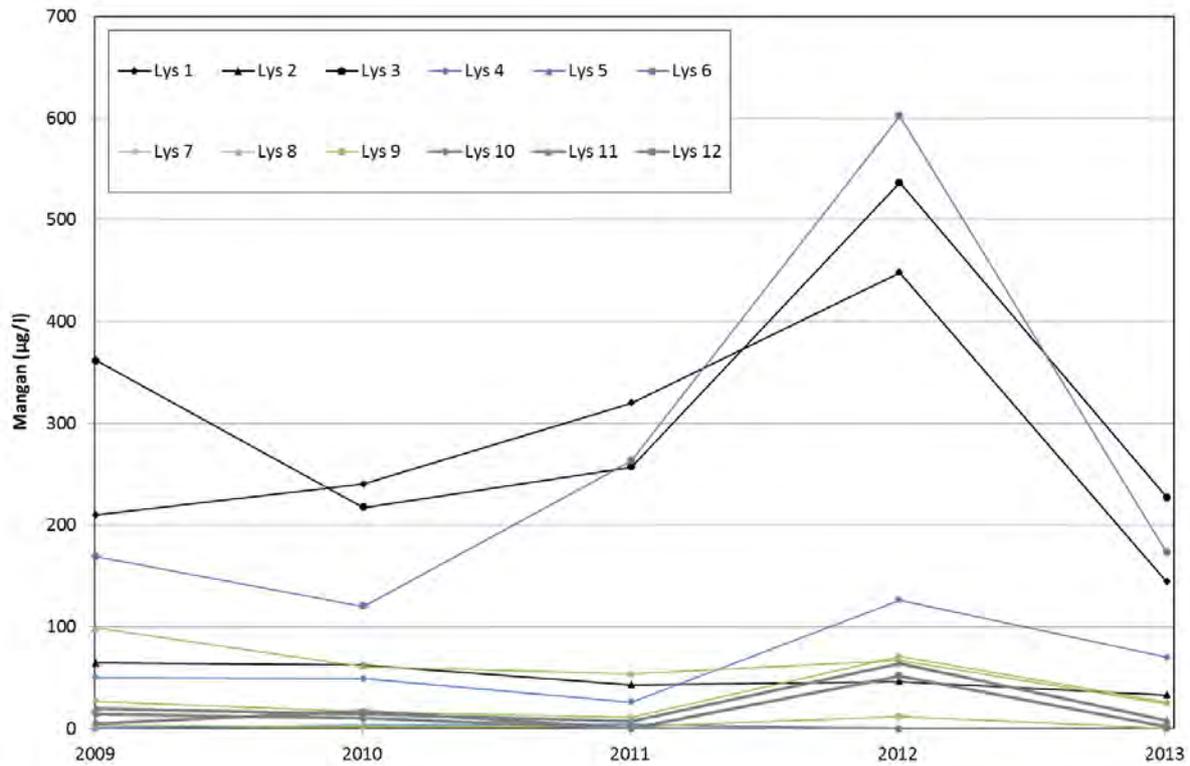
Der Wert für Mangan (Grenzwert 50 Mikrogramm je Liter nach TrinkwV) liegt teils bei  $600$   $\mu\text{g/l}$ . Es ist keine Tendenz sichtbar, aber das Jahr 2012 zeigt bei allen Lysimetern eine Erhöhung der Werte, die im Jahr 2013 wieder einheitlich zurückgeht. Aufgrund der geringen Anzahl an Werten (Datenlücken sowie Messung erst seit 2009) ist noch keine belegbare Interpretation möglich.

Die Spitzen der Aluminiumkonzentrationen mit teils  $3.500$   $\mu\text{g/l}$  - bei einem Grenzwert der TrinkwV von  $200$   $\mu\text{g/l}$  - lagen in den Jahren 2000, 2001 und 2005. Es kam im Jahre 2012, genau wie beim Mangan, zu einem allgemeinen Anstieg, 2013 gingen die Werte abermals zurück.

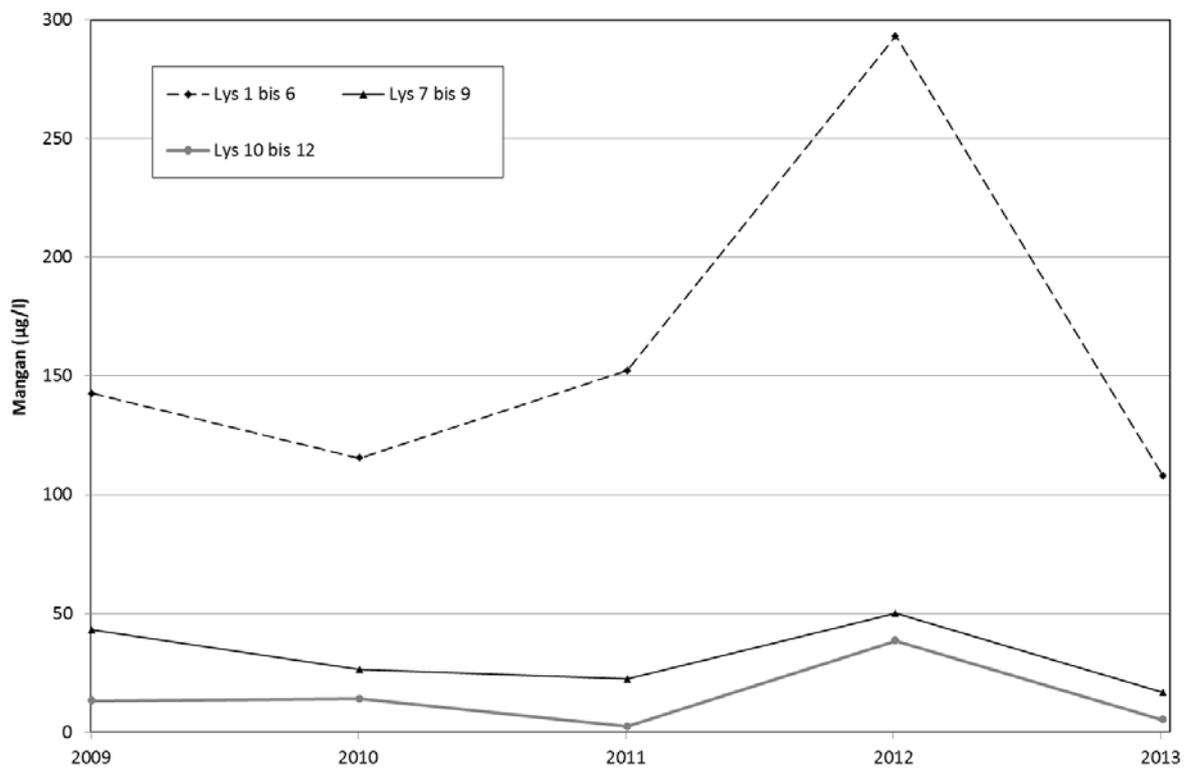
Bei Aluminium zeigt sich, dass die Werte aus der TrinkwV nur bedingt für den Vergleich geeignet sind, hier empfiehlt sich eher ein Blick auf die geogen beeinflussten Werte im Grundwasser in SCHLEYER und KERNDORFF (1992).

Sowohl bei Mangan als auch bei Aluminium sind die Konzentrationen in den Lysimetern 1 bis 6 stets am höchsten. Im Lysimeter 3 korrespondierten die hohen Aluminiumkonzentrationen mit niedrigen pH-Werten. Der Rolle des Substrates sollten weitere Untersuchungen gewidmet werden. Für eine Versauerung konnten in keiner der Lysimetergruppen konkrete Anhaltspunkte gefunden werden. Das Verhältnis von Mangan zu den Kationen gibt hier keinen Aufschluss, weil es innerhalb der 12 Lysimeter ohne erkennbare Regelmäßigkeiten weit variiert. Aufgrund der geringen - und zuletzt generell geringer werdenden - Konzentration von Kationen sowie der tendenziell immer wieder möglichen Erhöhung der Konzentrationen von Mangan und Aluminium ist die Gefahr der Bodenversauerung aber grundsätzlich gegeben. Für alle anderen Parameter lässt sich das Sickerwasser als unbedenklich einstufen. Deshalb kann der Standort als wenig belastet bezeichnet werden.

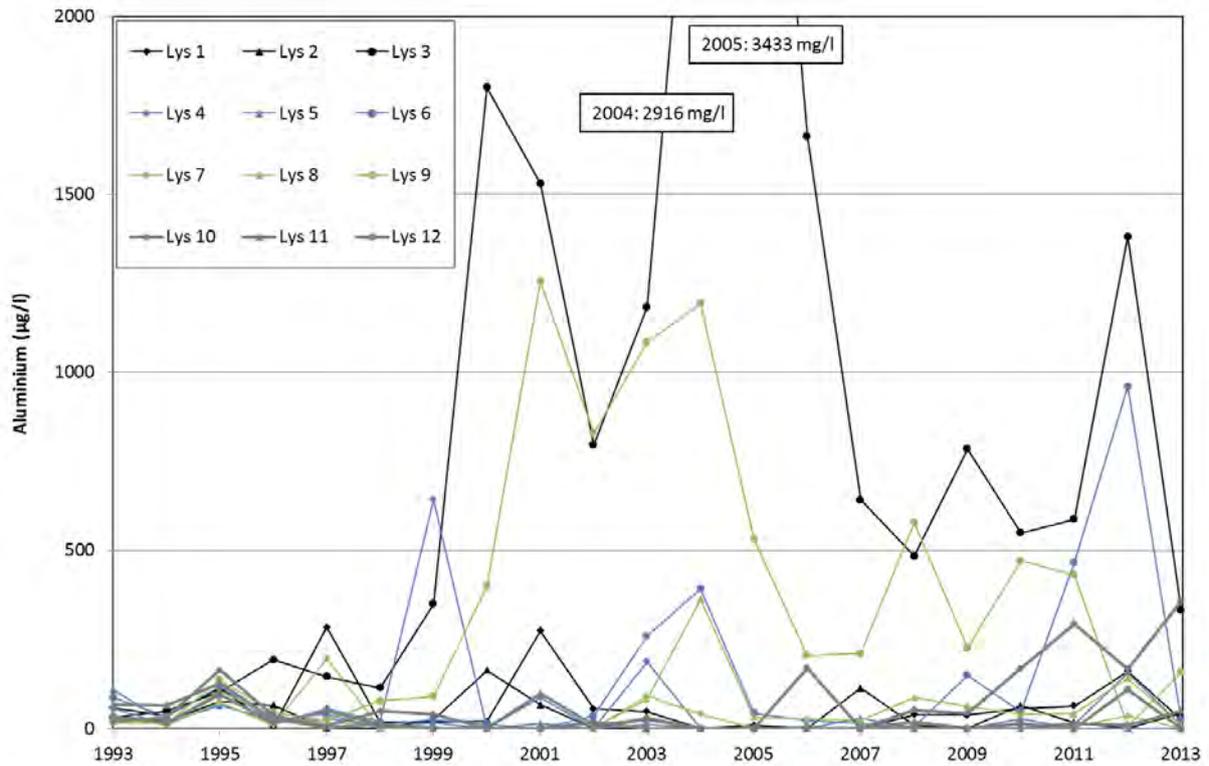
Abschließend wird nochmals darauf hingewiesen, dass die Zuordnung der jeweiligen Konzentrationen zu den entsprechenden Ablaufmengen für die Berechnung von korrekten Mischungskonzentrationen sowie für aussagefähige Interpretationen unabdingbar ist!



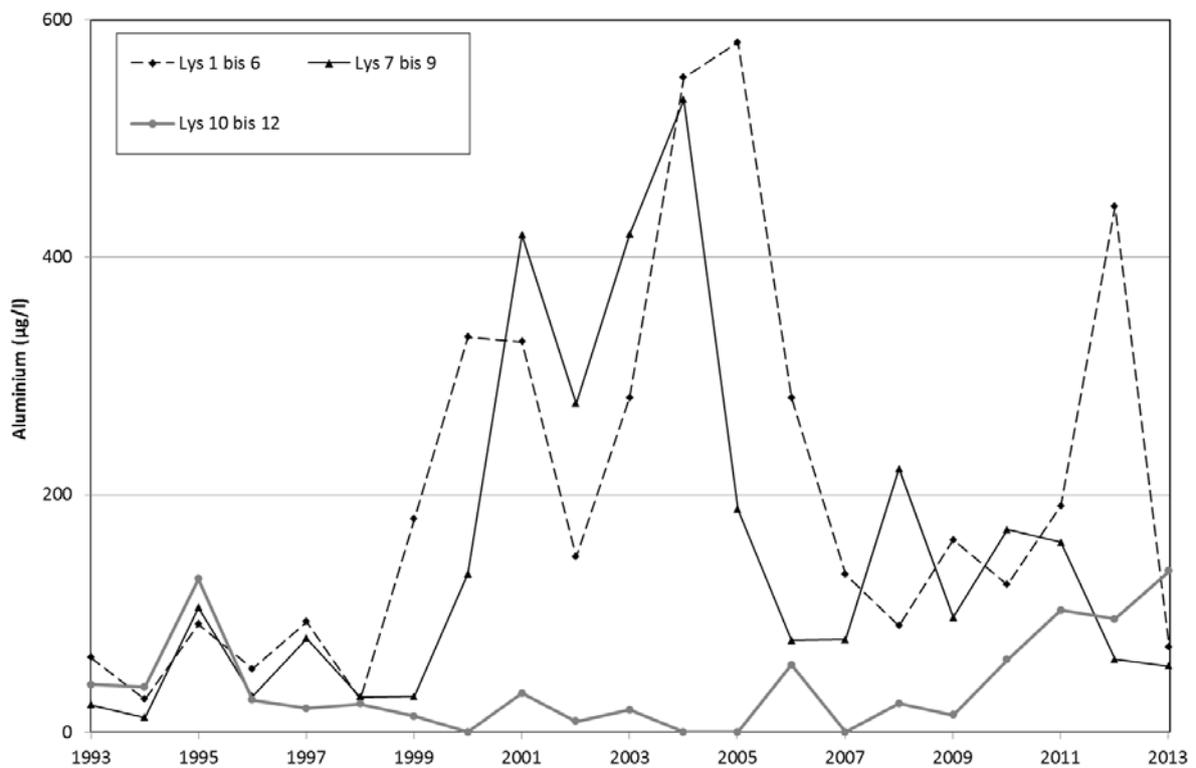
**Abbildung 35:** Durchschnittliche Konzentrationen von Mangan in den Jahren 2009 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 36:** Durchschnittliche Konzentrationen von Mangan in den Jahren 2009 bis 2012 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 37:** Durchschnittliche Konzentrationen von Aluminium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser der 12 Lysimeter, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 38:** Durchschnittliche Konzentrationen von Aluminium in den Jahren 1993 bis 2013 im Sickerwasser, gemittelt für drei Lysimetergruppen, Lysimeterstation Colbitz.

#### 4. Analyse des Niederschlagsgeschehens in Colbitz zwischen 1969 und 2013 im Kontext zu den DWD-Niederschlagsstationen Angern, Born, Dolle, Letzlingen und Zielitz sowie Ergebnisdarstellung

- Durchführung der Niederschlagskorrektur der täglichen Messwerte → windbedingter Messfehler nach Richter 1995 sowie Durchführung einer Homogenitätsprüfung
- Berücksichtigung der Anpassung des Messnetzes (1968-2010 Hellmann-Regenmesser, ab 07/2010 Niederschlagsgeber mit digitaler Aufzeichnung)
- Trendermittlung

##### 4.1 Messung und Korrektur

Die Messung des Niederschlages an der Lysimeterstation Colbitz erfolgte seit November 1968 bis zum 6. Mai 2010 mithilfe von bis zu vier (drei Regenmesser erdbodengleich und einer in 1m-Aufstellhöhe) baugleichen Hellmann-Regenmessern bei täglicher Datenerfassung. Die Aufbereitung der bis dahin handschriftlichen vorliegenden Daten erfolgte 2008/2009 durch FUGRO-HGN im Auftrag des LHW (Bericht unveröffentlicht). Hierbei wurde der Median der jeweiligen Niederschlagswerte dann als Tageswert ermittelt. Diese Methode wird vom Bearbeiter als optimal gesehen, um eventuell fehlende Daten einzelner Geräte auszugleichen.

Mit der Einrichtung eines meteorologischen Messplatzes neben den Lysimetern im Juni 2010 wurden zwei neue, digital aufzeichnende Niederschlagsgeber (ebenerdig und in 1 Meter Höhe) installiert, welche zwei der drei ebenerdigen Hellmann-Regenmesser ersetzt haben.

Die Korrektur aller seit 1968 vorliegenden Werte erfolgte nach RICHTER (1992). Die verwendete Funktion lässt sich dabei generalisiert so darstellen:

$$P_{korr} = P_{mess} + \varepsilon * P_{mess}^b$$

mit

$P_{korr}$  ... korrigierter Niederschlag,

$P_{mess}$  ... gemessener Niederschlag,

$\varepsilon$  ... Faktor für Windabschirmung und  $b$  ... Faktor für die Niederschlagsart.

Die Horizontabschirmung in Colbitz wird als mäßig geschützte Stationslage gewertet. Korrigiert wurde deshalb grundsätzlich mit

$$P_{korr} = P_{mess} + 0,28 * P_{mess}^{0,38} \quad \text{im Sommerhalbjahr,}$$

sowie mit

$$P_{korr} = P_{mess} + 0,24 * P_{mess}^{0,46} \quad \text{im Winterhalbjahr.}$$

In folgenden Zeiträumen wurde großzügig als Schneefall korrigiert:

- 23.11.2010 bis 12.01.2011; 20.01. bis 02.02. und 10.02. bis 16.02.2011,
- 16.01. bis 21.02.2012,
- 15.11. bis 28.11.2012; 21.02. bis 22.03.2013.

Die Funktion lautet dann

$$P_{korr} = P_{mess} + 0,33 * P_{mess}^{0,82} .$$

Über einen Zeitraum folgte die Korrektur mit der Annahme von Mischniederschlag:

- 14.12.2012 bis 11.01.2013.

Es wurde dann diese Funktion zu Grunde gelegt:

$$P_{korr} = P_{mess} + 0,305 * P_{mess}^{0,55} .$$

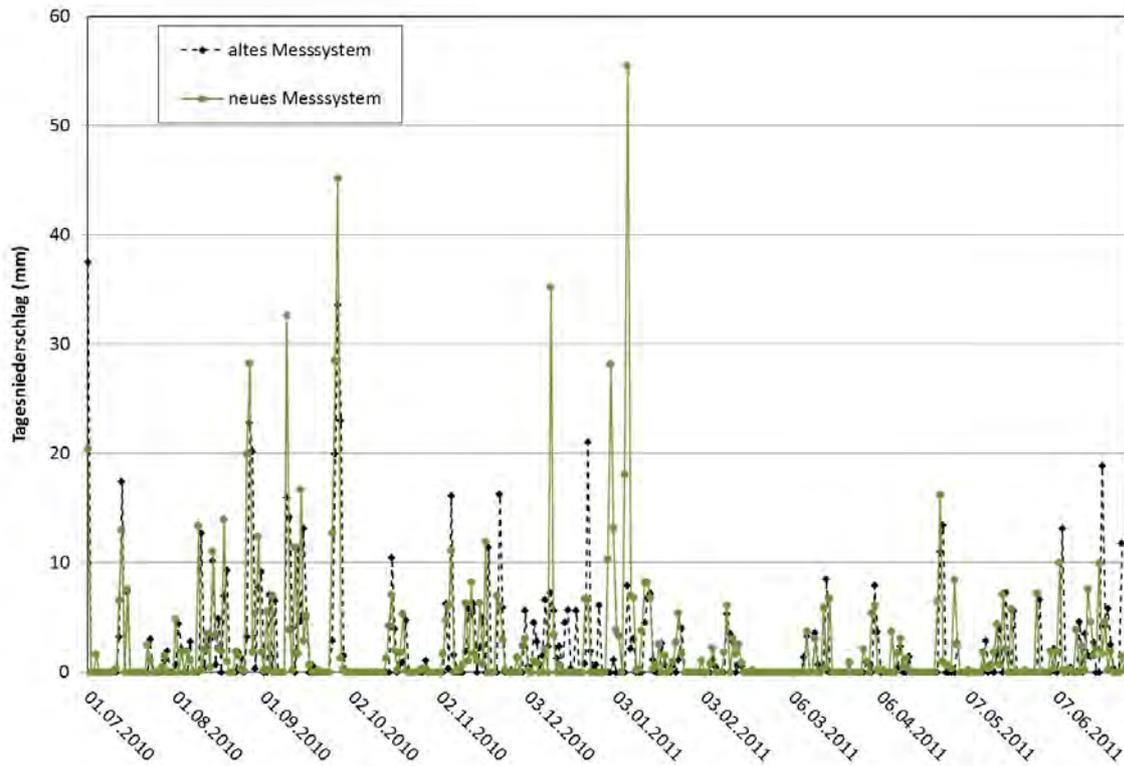
Weiterhin erfolgte der Vergleich der korrigierten Niederschlagswerte aus Colbitz mit den bereits korrigiert vorliegenden Werten von fünf weiteren Wetterstationen des DWD in der unmittelbaren Region.

#### 4.2 Vergleich der Messsysteme

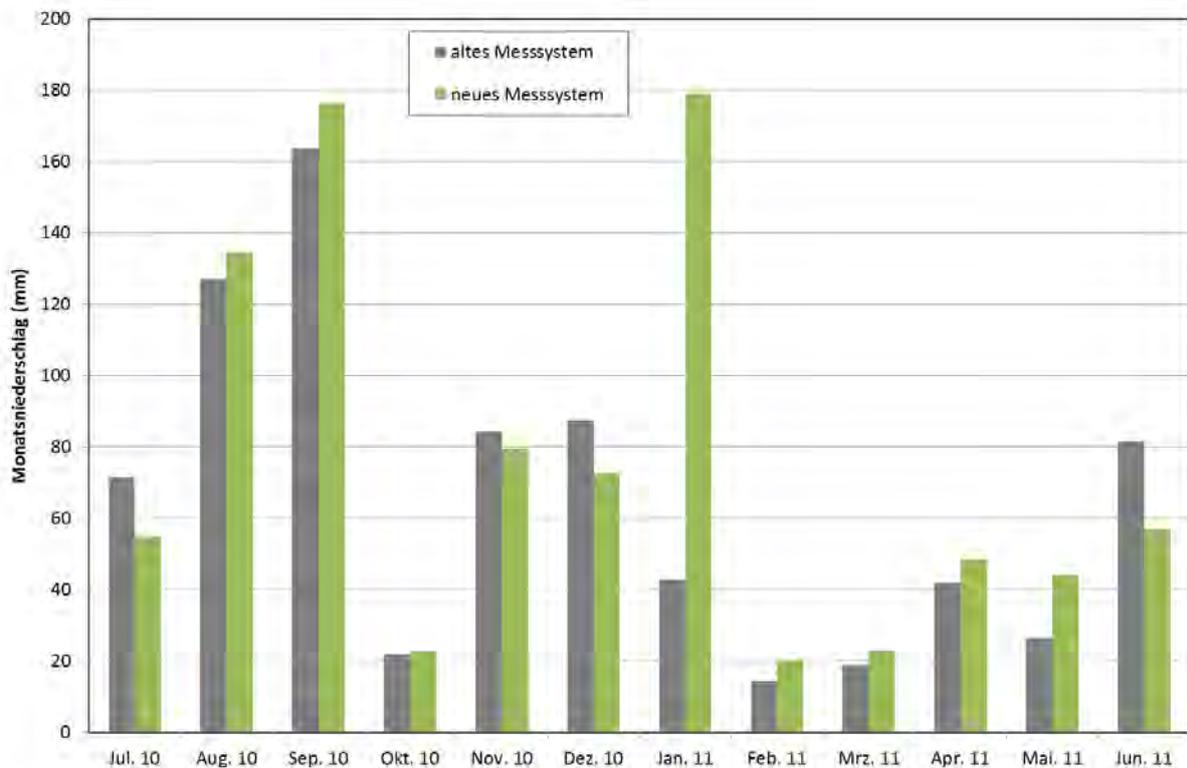
Abbildung 39 zeigt die Tageswerte der beiden verschiedenen Messverfahren, je in einem Meter Höhe, für die ersten 12 Monate des parallelen Laufes ab 1. Juli 2010. Für Abbildung 40 erfolgte die Zusammenfassung zu Monatswerten. Tendenziell neigt das neuere bzw. digitale System zum Überschätzen, was in Abbildung 39 an höheren Tageswerten sichtbar wird (Ende August und Ende September 2010, sowie besonders auffällig am 11. Dezember 2010 und mehrfach Anfang Januar 2011).

Außer im November und Dezember 2010 sowie im Juni 2011 wird mit dem neueren System stets mehr Niederschlag erfasst, wie in Abbildung 40 deutlich wird. Besonders groß ist die Differenz zwischen beiden Systemen im Januar 2011. Die Niederschlagsmenge von 170 mm beim digitalen System kann dabei nicht der Realität entsprechen. Die erfasste Niederschlagsmenge lag in diesem Monat in Born bei 38,4 mm und in Zielitz bei 36,9 mm. Mit den Lysimetern in Colbitz wurden Werte zwischen 85 mm und 172 mm ermittelt (siehe auch Kapitel 6). Der Monat war schneereich, wodurch es zu Verwehungen und lateralem Abfluss gekommen sein kann. Der ebenerdige digitale Niederschlagsgeber in Colbitz hatte sogar 268,9 mm (unkorrigiert) angezeigt. Es kann hier nicht geklärt werden, inwieweit ein Regenschirm in einem Meter Höhe von Schneeverwehungen und Schneeschmelze beeinflusst sein könnte.

Insgesamt wurden in dem zehnmonatigen Zeitraum mit dem älteren Hellmann-Regenschirm 782 mm und mit dem neuen Niederschlagsgeber 913 mm erfasst. Das legt zwar den Schluss nahe, dass mit dem erneuerten Messsystem die Niederschlagsmenge überschätzt wird, die unklare Situation im Januar 2011 relativiert dies allerdings. Der weiter unten geführte Vergleich mit den Werten der anderen Stationen verdeutlicht, dass sich Colbitz bei den Niederschlagsmengen über alle drei zur Anwendung gekommenen Systeme kontinuierlich gleich einordnet - und das stets im oberen Bereich.



**Abbildung 39:** Tageswerte des Niederschlages, erfasst mit zwei verschiedenen Messgeräten (Hellmann-Regenmesser und Niederschlagsgeber mit Reedkontakt) zwischen 1. Juli 2010 und 30. Juni 2011, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 40:** Monatswerte des Niederschlages, erfasst mit zwei verschiedenen Messgeräten (Hellmann-Regenmesser und Niederschlagsgeber mit Reedkontakt) von Juli 2010 und Juli 2011, Lysimeterstation Colbitz.

### 4.3 Vergleich der Niederschlagsstationen

Die Niederschlagsstationen des DWD befinden sich in bzw. in der Nähe der Orte Angern, Born, Dolle, Letzlingen und Zielitz im nördlichen Teil des Landkreises Börde bzw. im südlichen Teil der Altmark (Letzlingen), folglich auch Abbildung 1 im Kapitel 1.2.

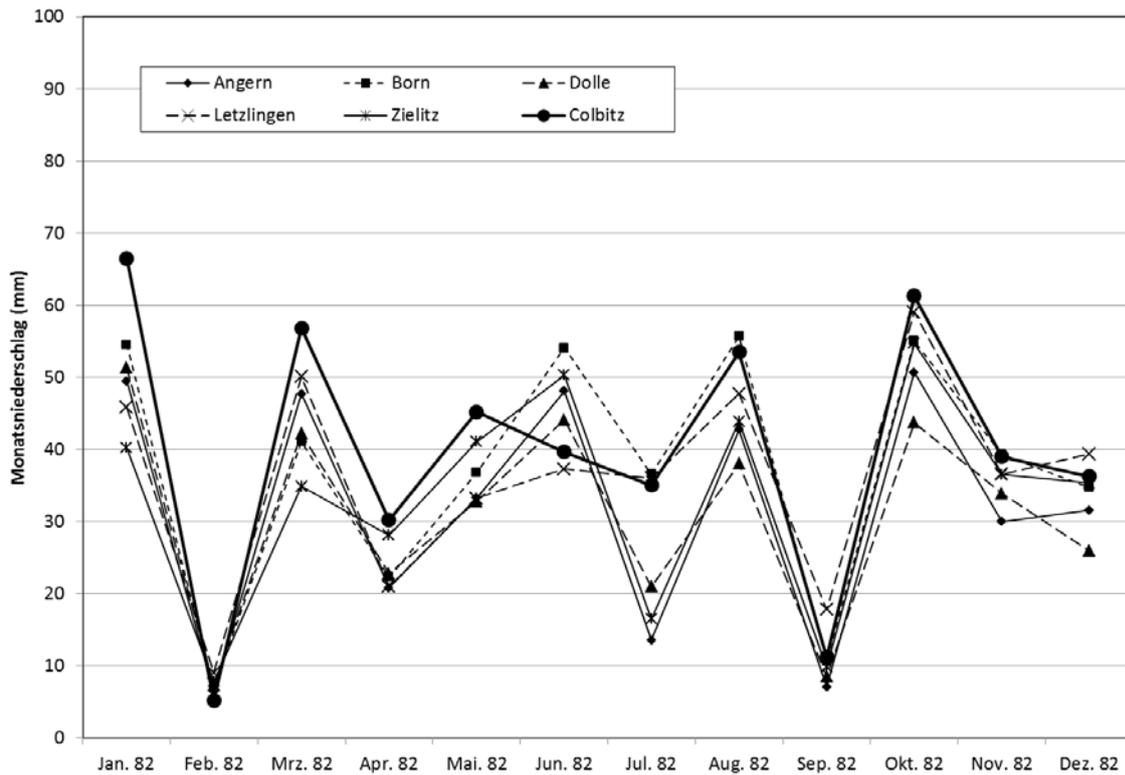
Tabelle 3 zeigt die Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit der Daten sowie die durchschnittliche jährliche Regenmenge zwischen 1969 und 2013, ermittelt ausschließlich aus den Jahren mit vollständigen Angaben. Es ist erkennbar, dass Colbitz die höchste Gesamtmenge aufweist. In den einzelnen Jahren liegt die Station dabei stets im vorderen Bereich.

**Tabelle 3:** Die untersuchten Niederschlagsmessstationen in der Börde bzw. Altmark.

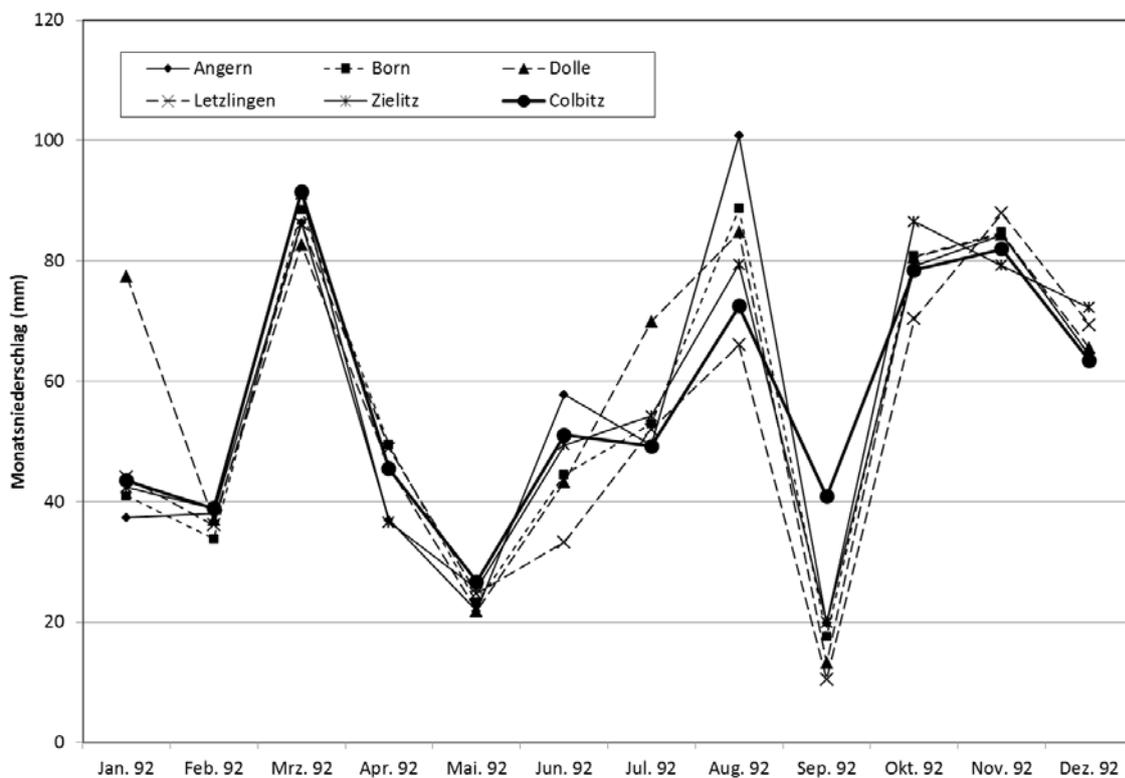
Station	Jahresniederschlag 1969-2013	unvollständige Jahre	fehlende Jahre
Angern (DWD)	580 mm	1970	seit 2007
Born (DWD)	625 mm	1995, 2006	2003-2005
Dolle (DWD)	607 mm	1987, 1988, 1997, 1998	seit 2007
Letzlingen (DWD)	643 mm	2001, 2003, 2011, 2012	2013
Zielitz (DWD)	618 mm	1970	-
Colbitz (LHW)	683 mm	-	-

Obgleich einige Stationen des DWD etliche Datenlücken aufweisen, so liefern doch allein die lange Dauer auf der einen sowie die Anzahl von insgesamt sechs Stationen auf der anderen Seite genügend Daten, um eine Einordnung von Colbitz in das Niederschlagsgeschehen der Region vornehmen zu können.

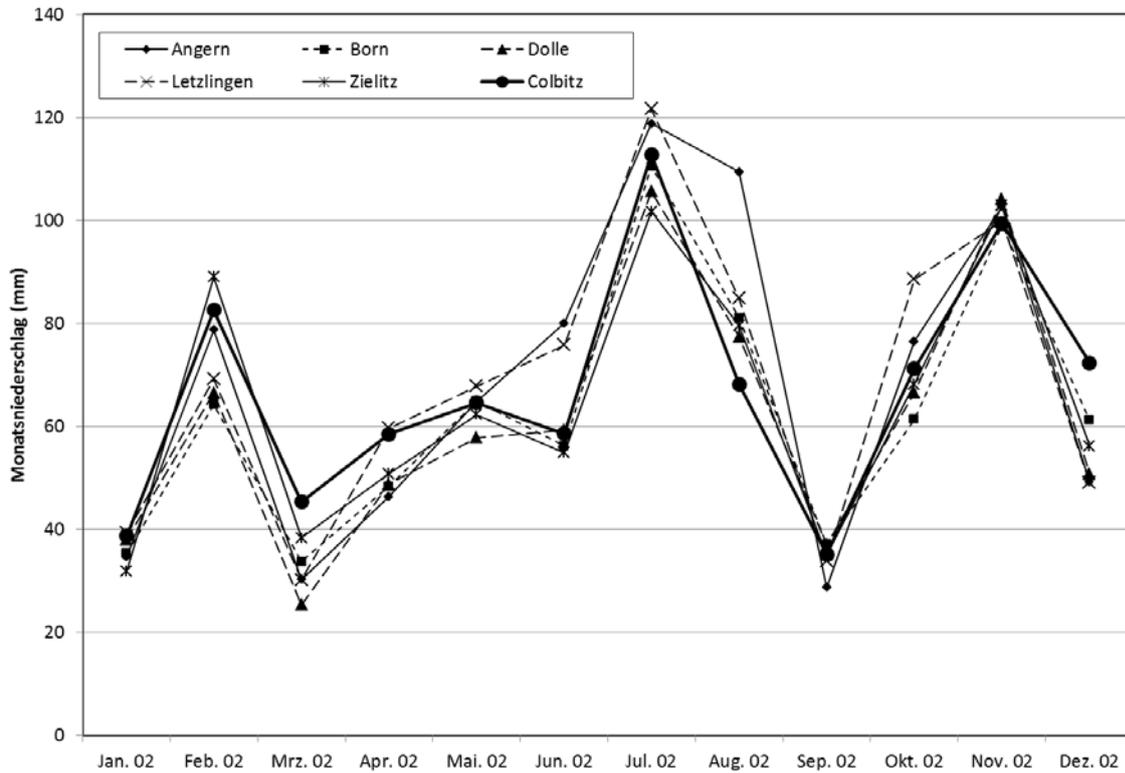
Fast lückenlose Datenreihen waren - neben Colbitz selbst - nur von Letzlingen und Zielitz verfügbar. Dennoch werden zunächst einige Betrachtungen durchgeführt, die sämtliche Stationen über die komplette Zeit von 45 Jahren beinhalten. So zeigen die Abbildungen 41 bis 44 die Monatswerte aller Stationen für die Jahre 1982, 1992, 2002 und 2012. Diese Jahre wurden vom Bearbeiter willkürlich ausgewählt. Hier ist zum einen zu sehen, dass die jahreszeitliche bzw. monatliche Regenverteilung tendenziell ähnlich ist, also bspw. niederschlagsreiche Sommermonate überall auftreten. Zum anderen ist die starke Variabilität in den einzelnen Monaten erkennbar, so wie die vier weit auseinander liegenden Juli-Niederschlagsmengen im Jahre 2012 (Abbildung 44).



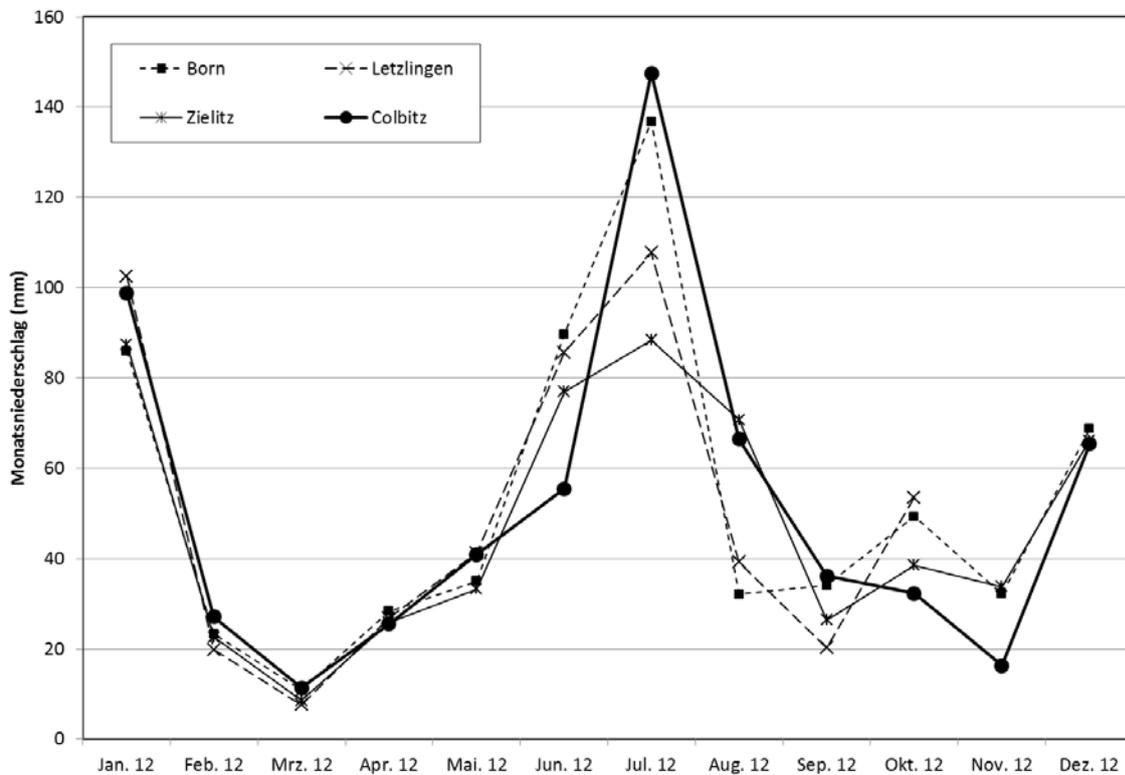
**Abbildung 41:** Monatswerte des Niederschlages im Jahr 1982, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region.



**Abbildung 42:** Monatswerte des Niederschlages im Jahr 1992, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region.



**Abbildung 43:** Monatswerte des Niederschlages im Jahr 2002, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region.

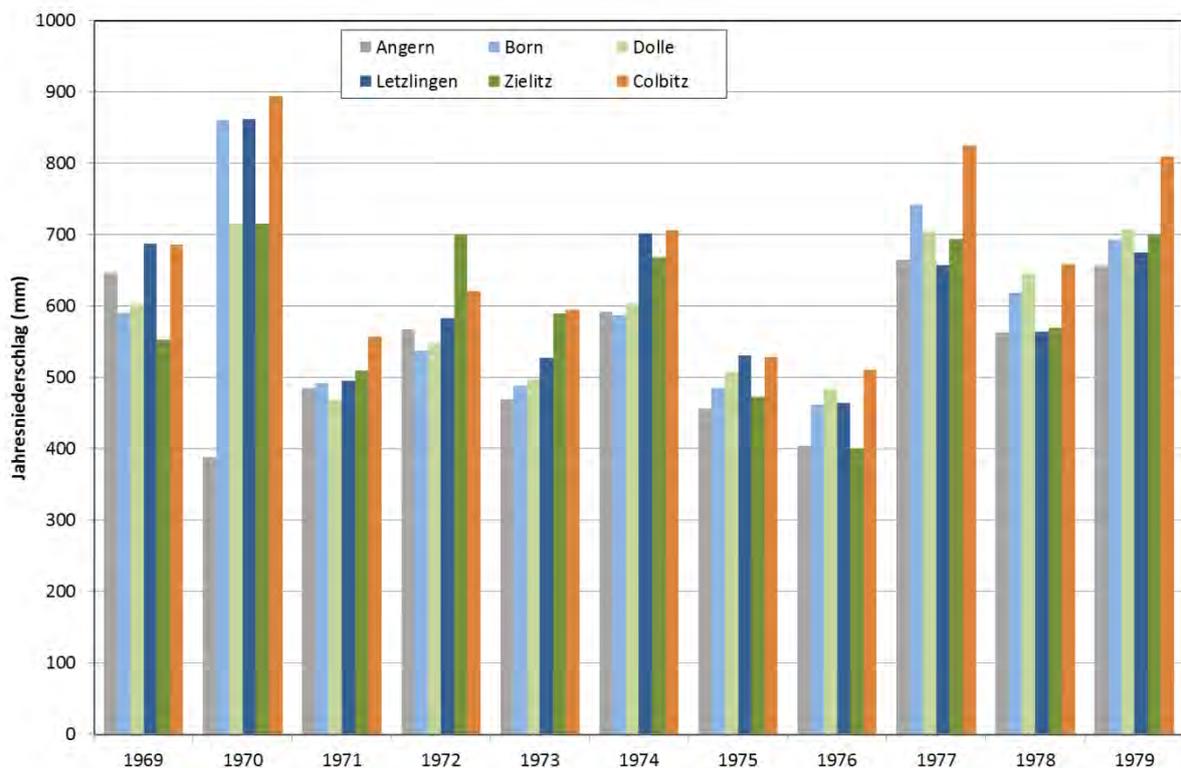


**Abbildung 44:** Monatswerte des Niederschlages im Jahr 2012, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie drei weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region.

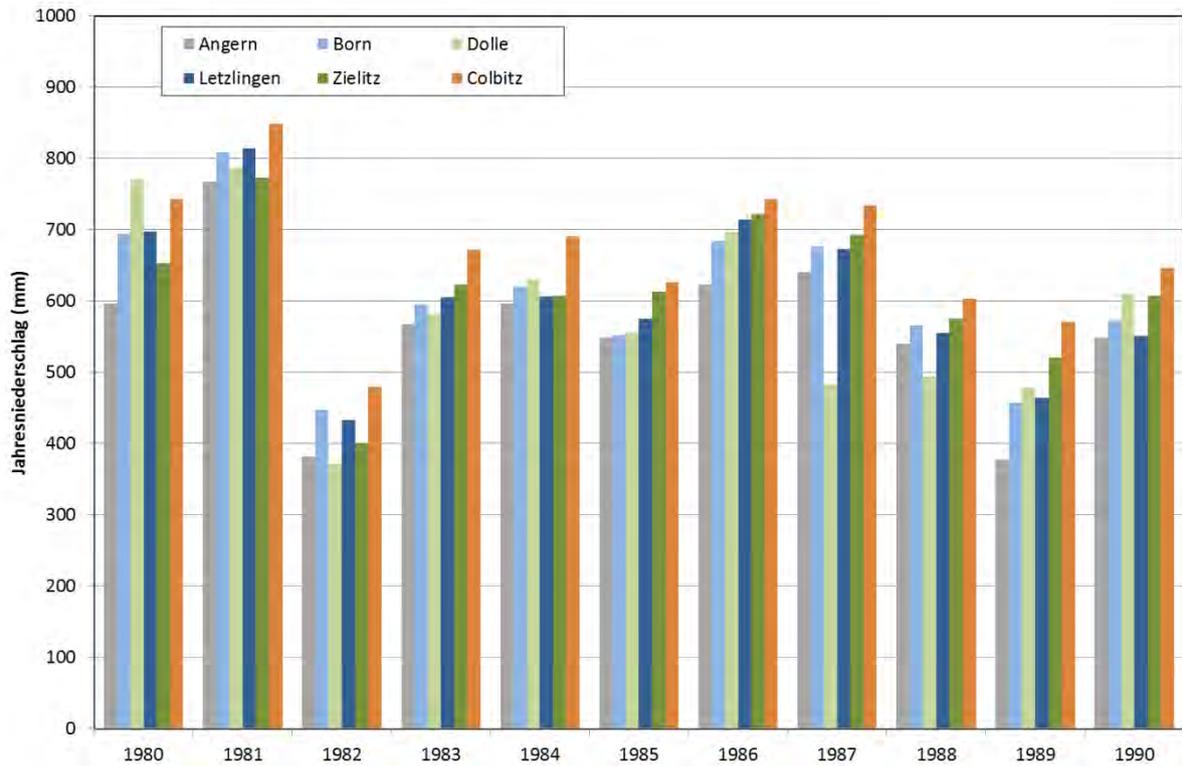
Die Abbildungen 45 bis 48 zeigen die jährlichen Regenmengen für alle sechs Stationen für jeweils 11 bzw. 12 Jahre. Mit allen vier Abbildungen wird der gesamte Zeitraum von 45 Jahren, also von 1969 bis einschließlich 2013, dargestellt. Aufgrund der Übersichtlichkeit wurde die Aufteilung in vier Abbildungen gewählt.

Das Fehlen einzelner Säulen, besonders in Abbildung 48, resultiert aus komplett fehlenden Daten. Jahre mit nur partiell fehlenden Daten wurden nicht herausgenommen und sind an erheblich verkürzten Säulen zu erkennen. Bei den DWD-Niederschlagsstationen, wo Daten am Ende fehlen, wurde der Betrieb eingestellt. Zur genauen Auswertung empfiehlt sich daher der parallele Blick in Tabelle 3.

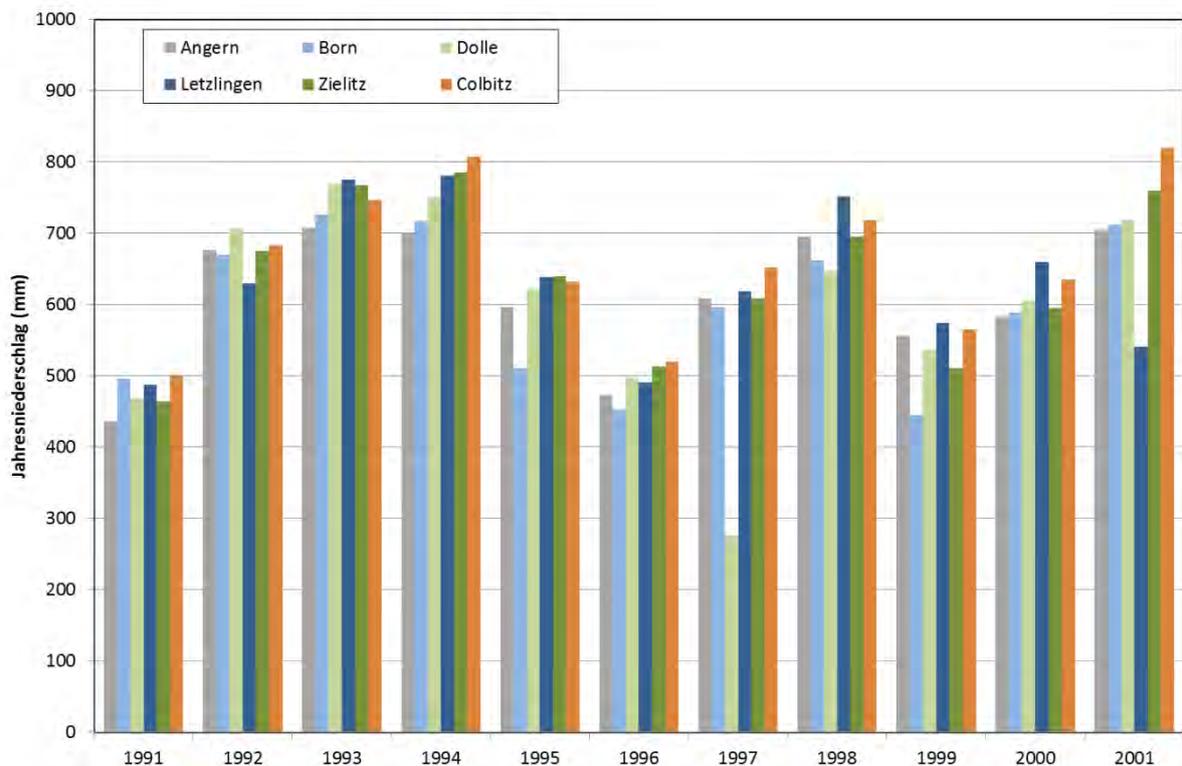
Es ist zu erkennen, dass Colbitz seit den 1970er Jahren durchweg zu den regenreichsten Standorten gehört.



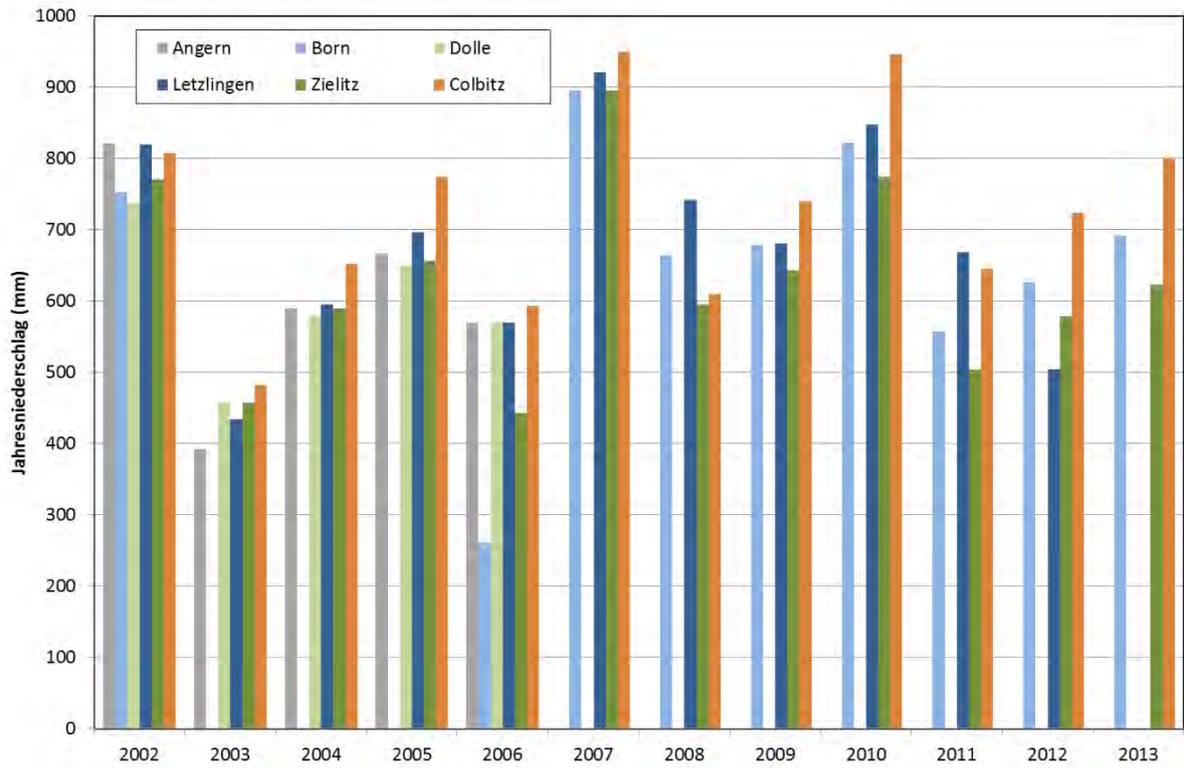
**Abbildung 45:** Jahreswerte des Niederschlages der Jahre 1969 bis 1979, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region.



**Abbildung 46:** Jahreswerte des Niederschlages der Jahre 1980 bis 1990, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region.

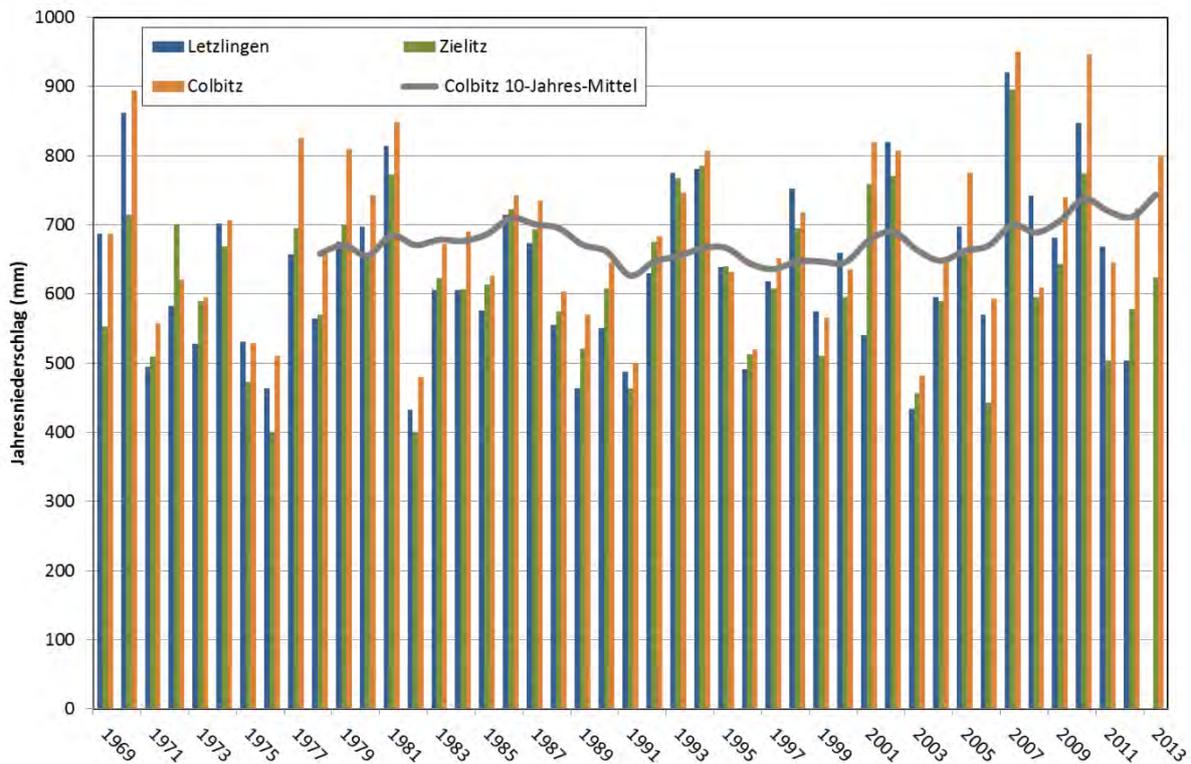


**Abbildung 47:** Jahreswerte des Niederschlages der Jahre 1991 bis 2001, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region.



**Abbildung 48:** Jahreswerte des Niederschlages der Jahre 2002 bis 2013, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie fünf weiteren DWD-Niederschlagsstationen in der Region.

In Abbildung 49 ist nochmals die gesamte Zeitreihe von 45 Jahren dargestellt, hier neben Colbitz nur mit den beiden Stationen Letzlingen und Zielitz, jenen Stationen mit der besten Datenlage. Das 10-Jahres-Mittel für Colbitz zeigt kaum langfristige Trends, jedoch tendenziell zunehmende Regenmengen seit 2003.



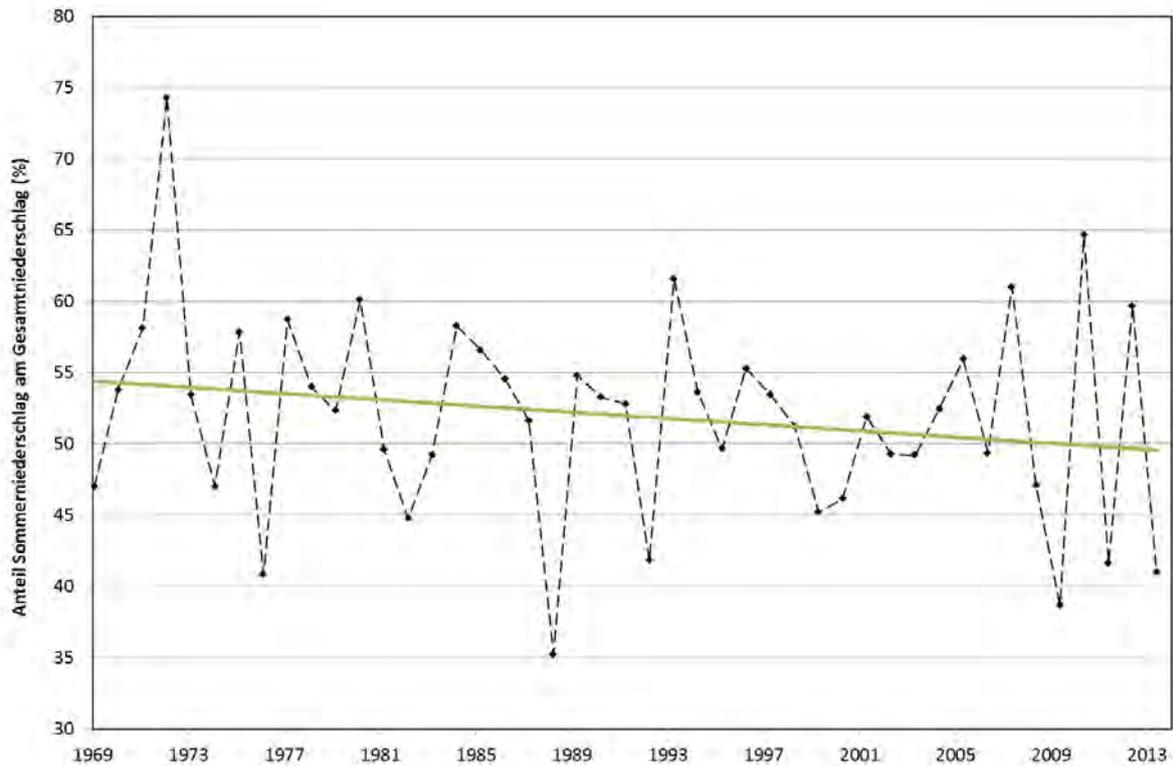
**Abbildung 49:** Jahreswerte des Niederschlages der Jahre 1969 bis 2013, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz sowie bei den zwei DWD-Niederschlagsstationen Letzlingen und Zielitz.

#### 4.4 Weitere Trends

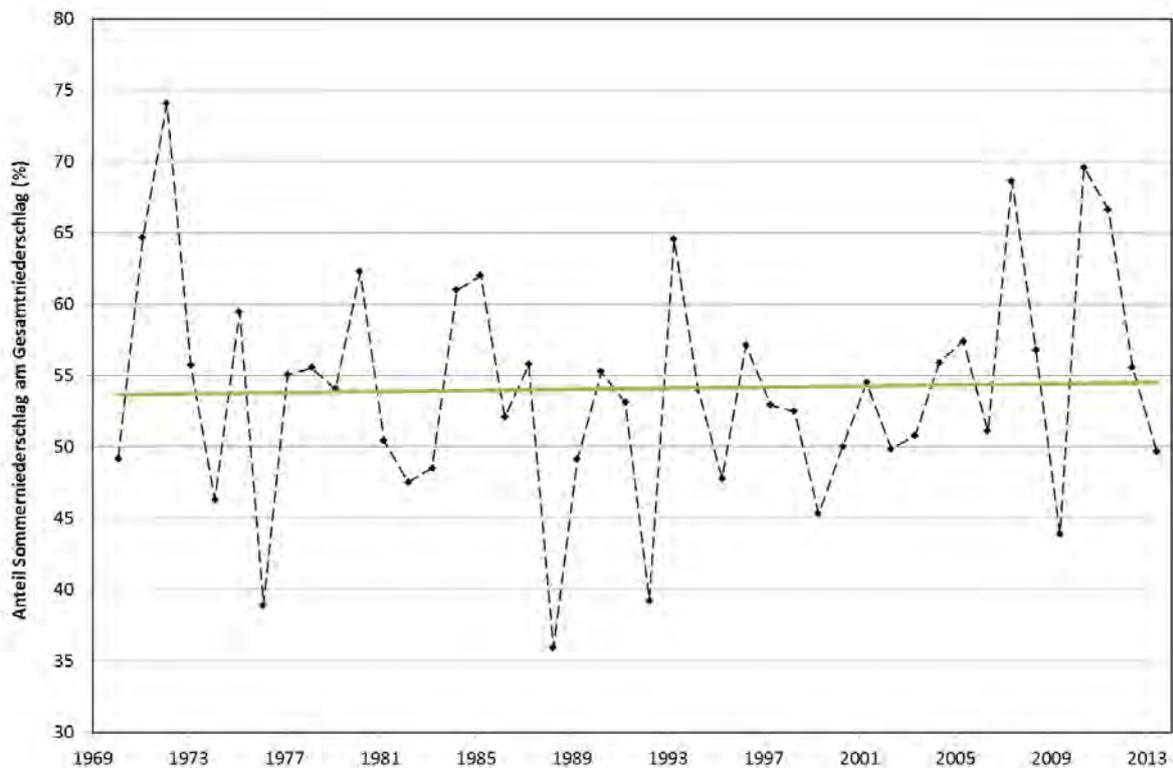
Abbildung 50 zeigt den Anteil der Sommerniederschläge (vom 1. April bis zum 30. September) an den jährlichen Gesamtniederschlägen im Zeitraum 1969 bis 2013 für die Station Colbitz. Dieser Anteil sank - hier dargestellt durch eine lineare Trendlinie - in den letzten 45 Jahren von ca. 54% auf knapp unter 51%. Dies spiegelt auch den Trend des Rückgangs der Sommerniederschläge wieder, wie er in den Projektionen zum Klimawandel in Sachsen-Anhalt beschrieben wird, welcher sich zukünftig noch weiter fortsetzen soll (WECHSUNG et al. 2008, PIK 2013).

Dass sich diese Beobachtung vom Standort Colbitz jedoch nicht auf die gesamte Region übertragen lässt, zeigt allein der Blick auf Abbildung 51. Hier ist eine leichte Zunahme der Sommerniederschläge von 53% auf 55% an der DWD-Niederschlagsstation in Zielitz zu erkennen.

Beim Vergleich von Abbildung 50 und 51 fällt auf, dass sich extreme Jahre gleichermaßen an beiden Standorten wiederfinden. So bspw. trockene Sommer in den Jahren 1976 und 1988 und niederschlagsreiche Sommer 1972 und 2010.



**Abbildung 50:** Prozentualer Anteil des Niederschlages in den Sommermonaten (01. April bis 30. September) am jährlichen Gesamtniederschlag der Jahre 1969 bis 2013, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz.

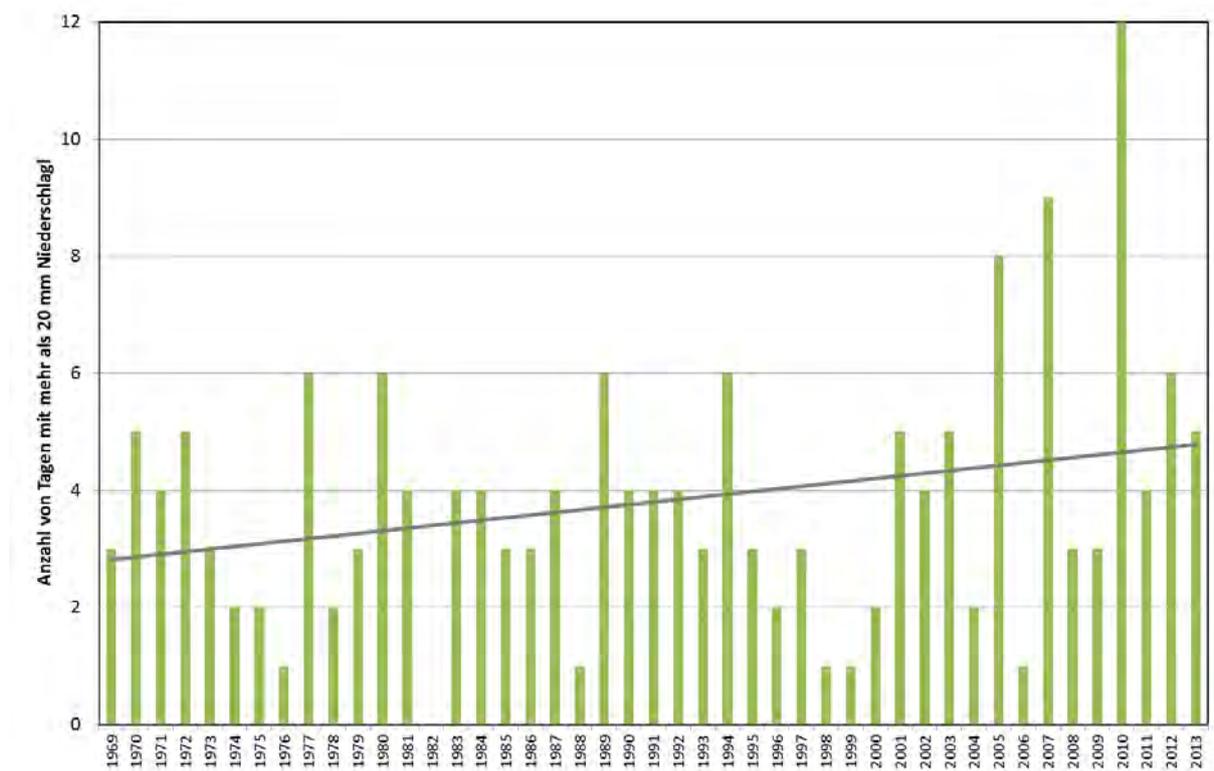


**Abbildung 51:** Prozentualer Anteil des Niederschlages in den Sommermonaten (1. April bis 30. September) am jährlichen Gesamtniederschlag der Jahre 1969 bis 2013, erfasst an der Station Zielitz.

Am Ende der Auswertung der Niederschlagsdaten erfolgt noch ein Blick auf die Anzahl der Tage mit hohen Niederschlagsmengen. Hier wurde nach eigenem Ermessen als untere Schwelle die Niederschlagsmenge von 20 mm pro Tag gewählt, um „niederschlagsreiche“ Tage zu definieren.

Für Colbitz wird dabei eine eindeutige Erhöhung der Anzahl solcher niederschlagsreichen Tage deutlich. Die Jahre mit mehr als sechs dieser Tage finden sich erst in den letzten acht Jahren, ein absolutes Extrem bildet das Jahr 2010 mit 12 Tagen (Abbildung 52).

Eine eingehende Untersuchung der Sachverhalte um die Regenmengenverteilung im Hinblick auf Extreme bzw. jahreszeitliche Verteilung wird für alle Stationen empfohlen.



**Abbildung 52:** Niederschlagsreiche Tage mit mehr als 20 mm NS-Menge in den Jahren 1969 bis 2013, erfasst an der Lysimeterstation Colbitz.

Angemerkt sei hier, dass es sich dabei nicht unbedingt um Starkregenereignisse handelt. Von Starkniederschlag wird bei großen Niederschlagsmengen pro Zeiteinheit gesprochen. Er fällt meist aus konvektiver Bewölkung, bspw. aus Cumulonimbuswolken (DWD 2014). Der DWD warnt deswegen vor Starkregen in zwei Stufen (wenn voraussichtlich folgende Schwellenwerte überschritten werden):

- Regenmengen  $\geq 10$  mm/1 Std. oder  $\geq 20$  mm/6 Std. (Markante Wetterwarnung)
- Regenmengen  $\geq 25$  mm/1 Std. oder  $\geq 35$  mm/6 Std. (Unwetterwarnung) (DWD 2014)

## 5. Betrachtung des innerjährlichen Gangs der meteorologischen Daten ab Juli 2010 und Ableitung erster Aussagen

Im Juli 2010 wurde das Messnetz ergänzt und neben den Lysimetern eine Klimastation (10 m Mast) eingerichtet. Neben dem bis dahin täglich erfassten Niederschlag werden dazu die in Tabelle 4 aufgeführten meteorologischen Daten ermittelt. Diese meteorologischen Messdaten sowie die Wägung und der Abfluss der 12 Lysimeter (ab Juli 2010 ebenfalls 10-minütig) werden digital in einem Datenlogger aufgezeichnet.

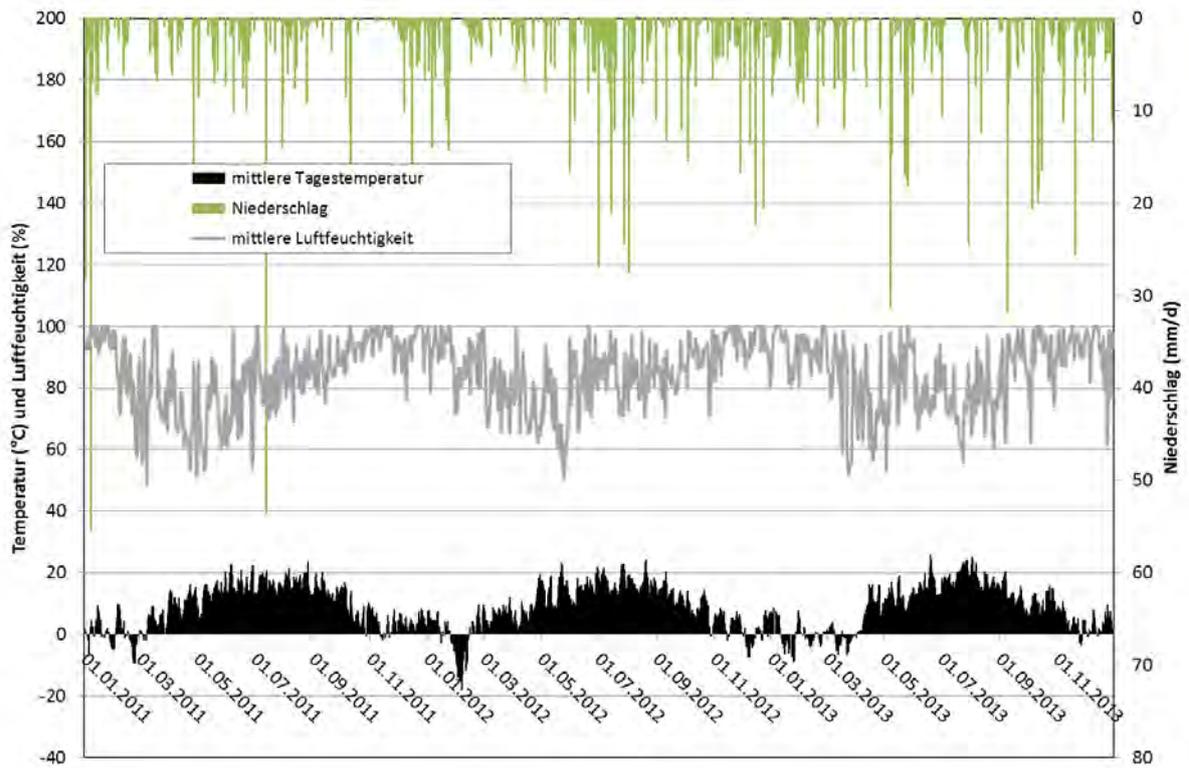
**Tabelle 4:** meteorologische Sensoren (Quelle: LHW)

Sensoren	Einheit	Messintervall
Windrichtung	Grad	10-minütig
Windgeschwindigkeit	m/s	10-minütig
Lufttemperatur	°Celsius	10-minütig
Relative Luftfeuchte	%	10-minütig
Luftdruck	hPa	10-minütig
Globalstrahlung	W/qm	10-minütig
Niederschlag 1 m	mm	10-minütig
Niederschlag 0 m	mm	10-minütig
Verdunstung nP	mm	10-minütig

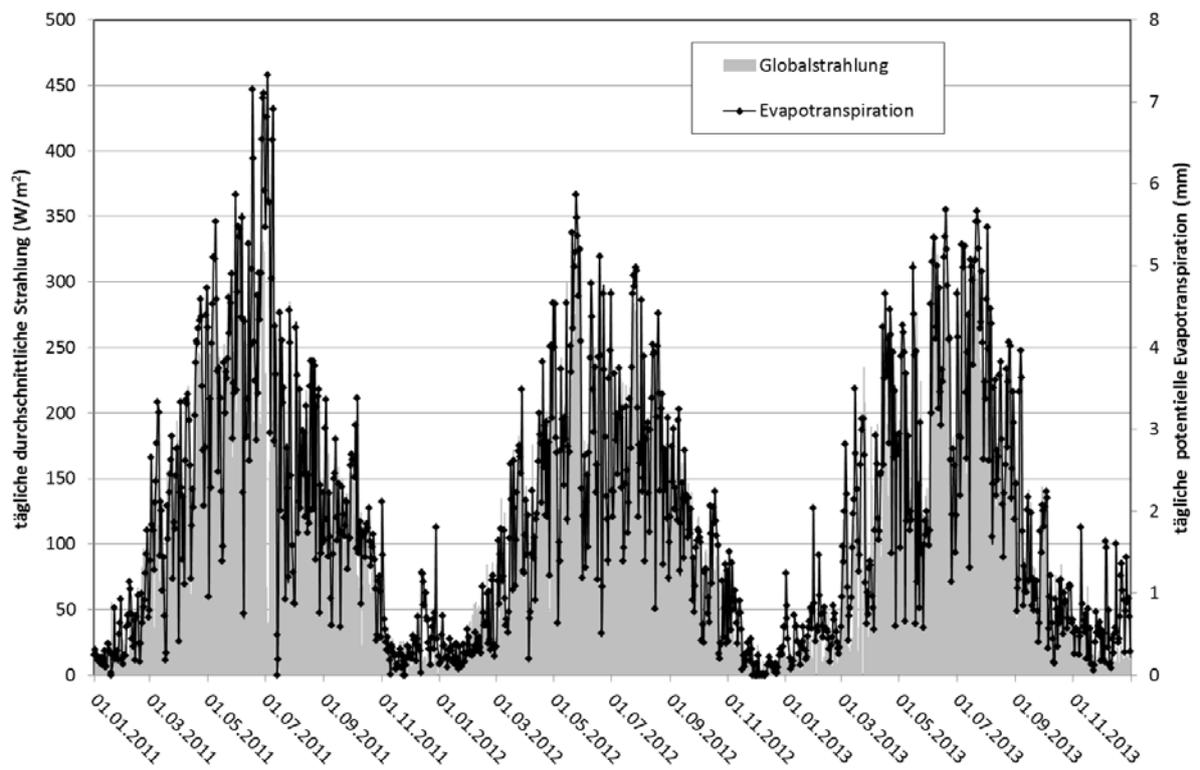
Den Daten lässt sich insgesamt eine sehr gute Qualität bescheinigen. Einzig kleine Datenlücken bei einzelnen Parametern schmälern den Gesamteindruck ein wenig, lassen aber dennoch solide Gesamtbilanzen zu.

Abbildung 53 zeigt die Tageswerte von mittlerer Temperatur, Niederschlag und mittlerer Luftfeuchtigkeit über die Jahre 2011, 2012 und 2013. Auf den Parameter Temperatur wird ebenso wie auf den Luftdruck im Folgenden nicht mehr eingegangen. Erläuterungen zum Niederschlag sind hier sehr knapp gehalten, da dieser im Kapitel 4 ausführlich beschrieben ist.

Wie aus Abbildung 54 ersichtlich korrespondieren die Messwerte der Globalstrahlung hervorragend mit denen der gemessenen potentiellen Evapotranspiration. Bei entsprechender Normierung der y-Achse verlaufen die Kurven fast deckungsgleich.

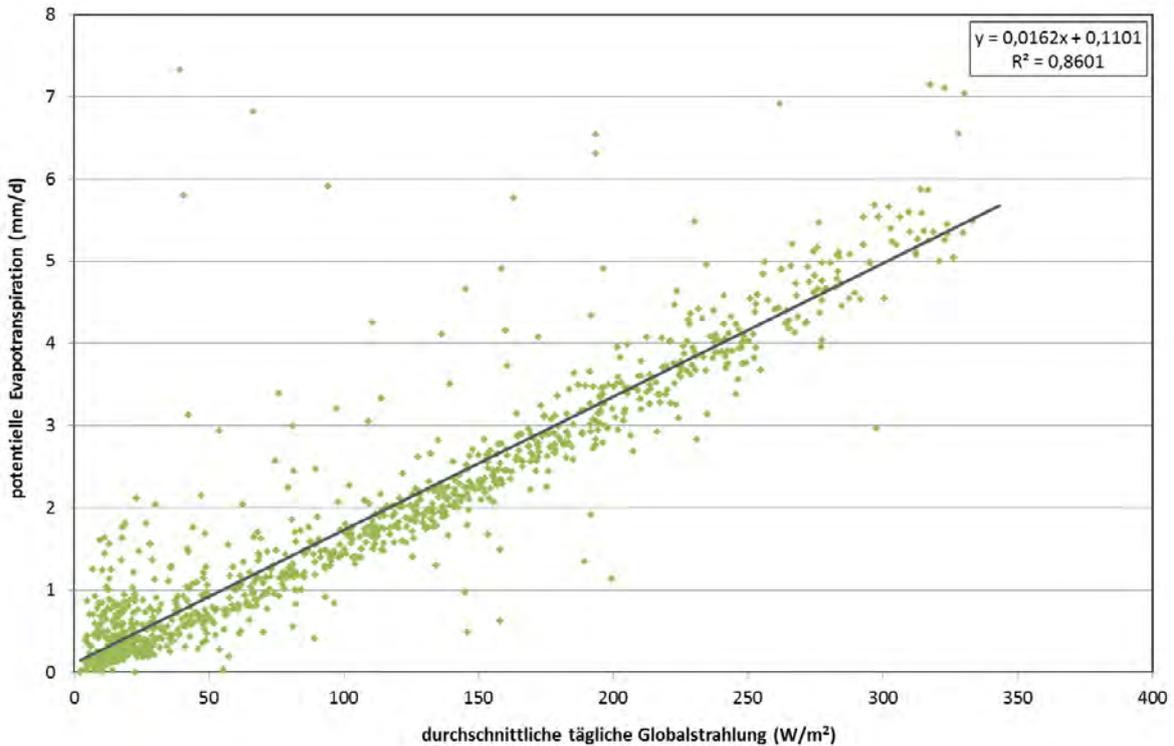


**Abbildung 53:** Mittlere Temperatur, Niederschlag und mittlere Luftfeuchtigkeit in den Jahren 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.



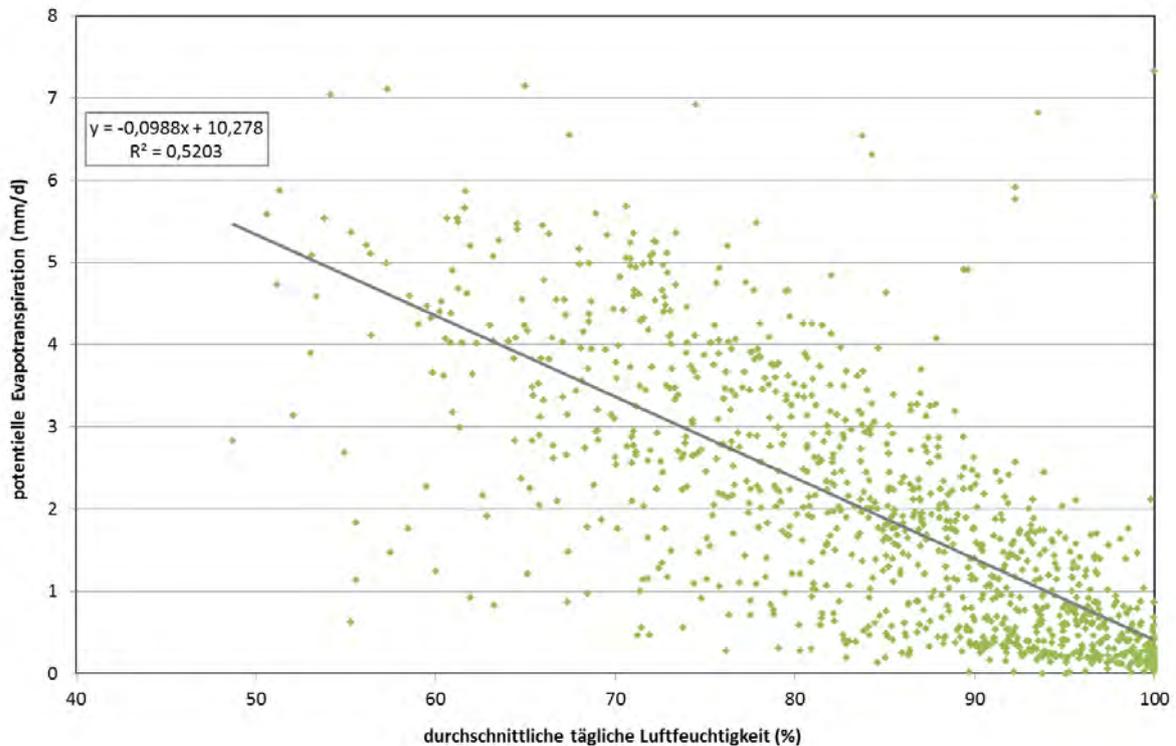
**Abbildung 54:** Globalstrahlung und potentielle Evapotranspiration für alle Tage in den Jahren 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.

Abbildung 55 zeigt die potentielle Evapotranspiration als Funktion der Globalstrahlung für alle Tage der Jahre 2011, 2012 und 2013. Es zeigt sich die fast ausschließliche Abhängigkeit der Evapotranspiration von der Globalstrahlung, so wie sie auch aus MONTIETH (1965) hervorgeht. Für die Regression wurde hier eine Linearfunktion gewählt, weil sie das höchste Bestimmtheitsmaß aufweist. Das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) ist dimensionslos, sein Wert liegt zwischen 0 und 1. Es zeigt die Übereinstimmung zwischen den vorliegenden Werten und einer Regressionsrechnung.



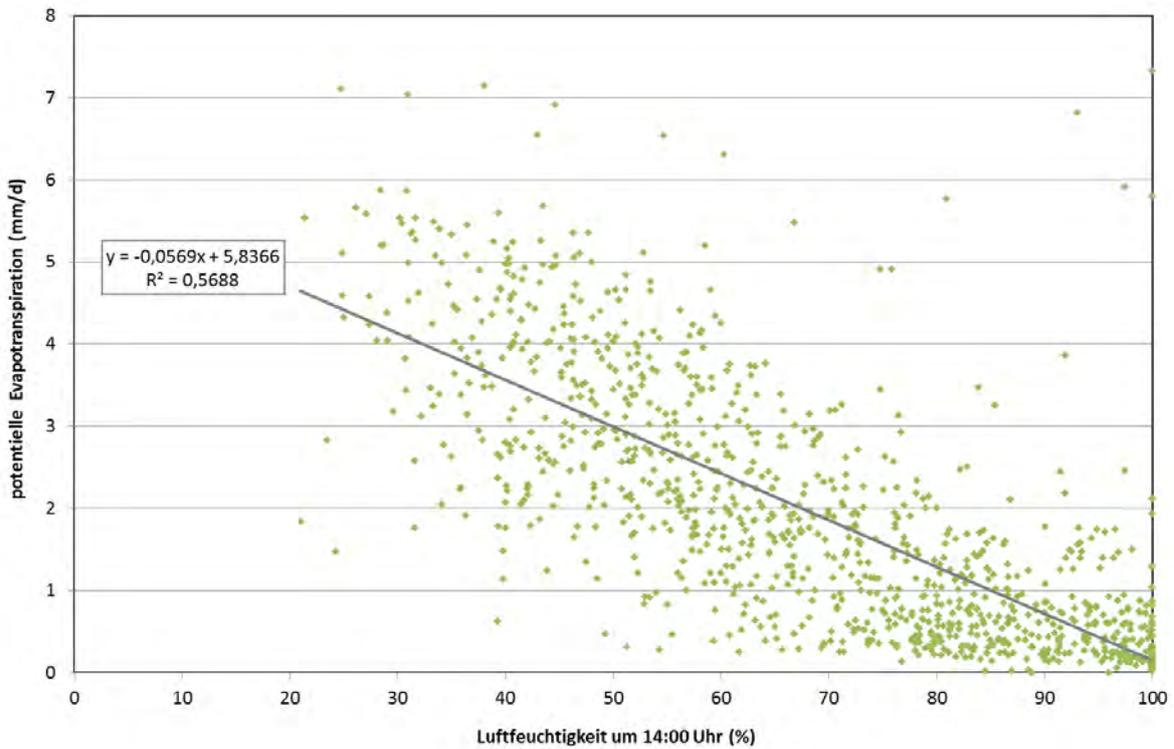
**Abbildung 55:** Potentielle Evapotranspiration als Funktion der Globalstrahlung für alle Tage 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.

Basierend auf Werten für Abbildung 53 und 54 zeigt Abbildung 56 die potentielle Evapotranspiration als Funktion der mittleren Luftfeuchtigkeit für alle Tage der Jahre 2011, 2012 und 2013. Es zeigt sich ein Zusammenhang wie von HAUDE (1955) beschrieben, jedoch mit einem geringeren Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) als ebenda.



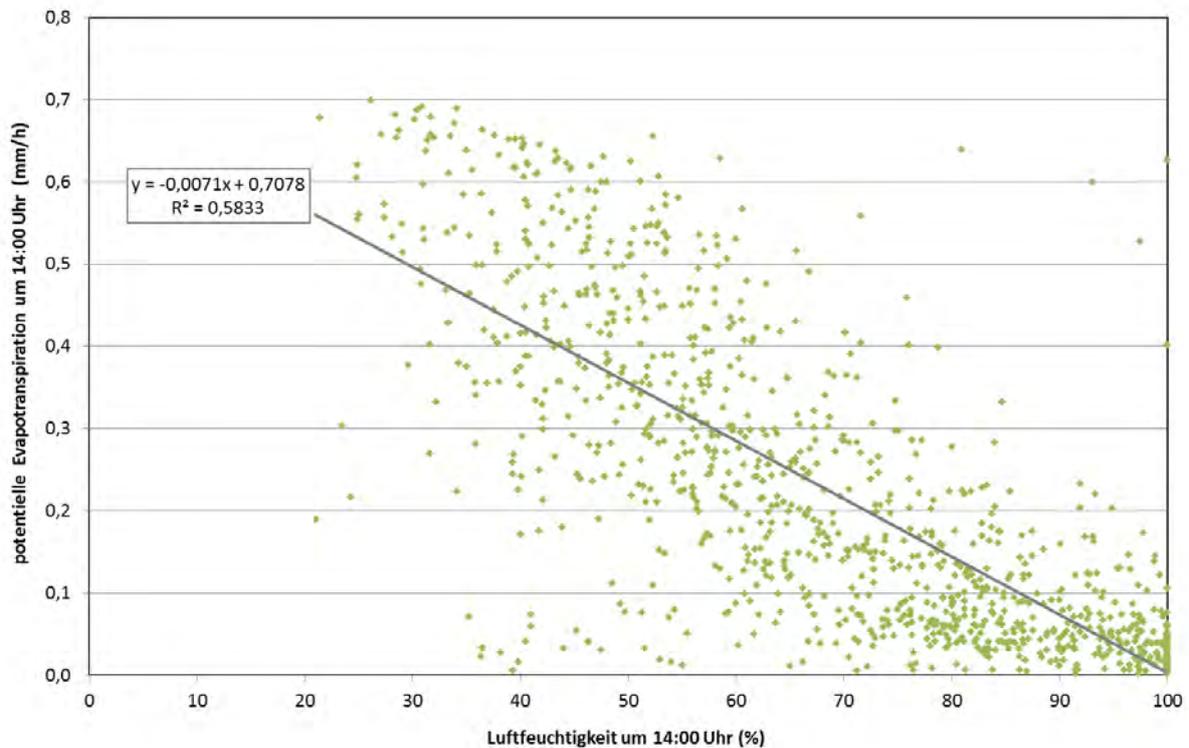
**Abbildung 56:** Potentielle Evapotranspiration als Funktion der mittleren Luftfeuchtigkeit für alle Tage 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.

Der Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und Evapotranspiration lässt sich noch stärker verdeutlichen, indem die Tageswerte der potentiellen Evapotranspiration als Funktion der Luftfeuchtigkeit in der Tageszeit mit der meist höchsten Verdunstung (die Stunde zwischen 13:00 Uhr und 14:00 Uhr) dargestellt werden. Dies wird in Abbildung 57 für den Feuchtigkeitswert um 14:00 Uhr gezeigt.



**Abbildung 57:** Potentielle Evapotranspiration als Funktion der Luftfeuchtigkeit um 14:00 Uhr für alle Tage 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.

Eine weitere Verfeinerung des sichtbaren Zusammenhanges von Luftfeuchte und Verdunstung zeigt Abbildung 58: Mit der Darstellung des Stundenwertes der potentiellen Evapotranspiration um 14:00 Uhr als Funktion der Luftfeuchtigkeit um 14:00 Uhr steigt  $R^2$  immerhin auf 0,58 gegenüber 0,52 in Abbildung 56 und 0,57 in Abbildung 57 (bei einer linearen Regression). Da die Globalstrahlung die hauptsächliche Triebkraft der Evapotranspiration ist und die Luftfeuchte nur eine untergeordnete Rolle spielt, sind deutlichere Zusammenhänge auch gar nicht zu erwarten.



**Abbildung 58:** Potentielle Evapotranspiration (Wert für eine Stunde) um 14:00 Uhr als Funktion der Luftfeuchtigkeit um 14:00 Uhr für alle Tage 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.

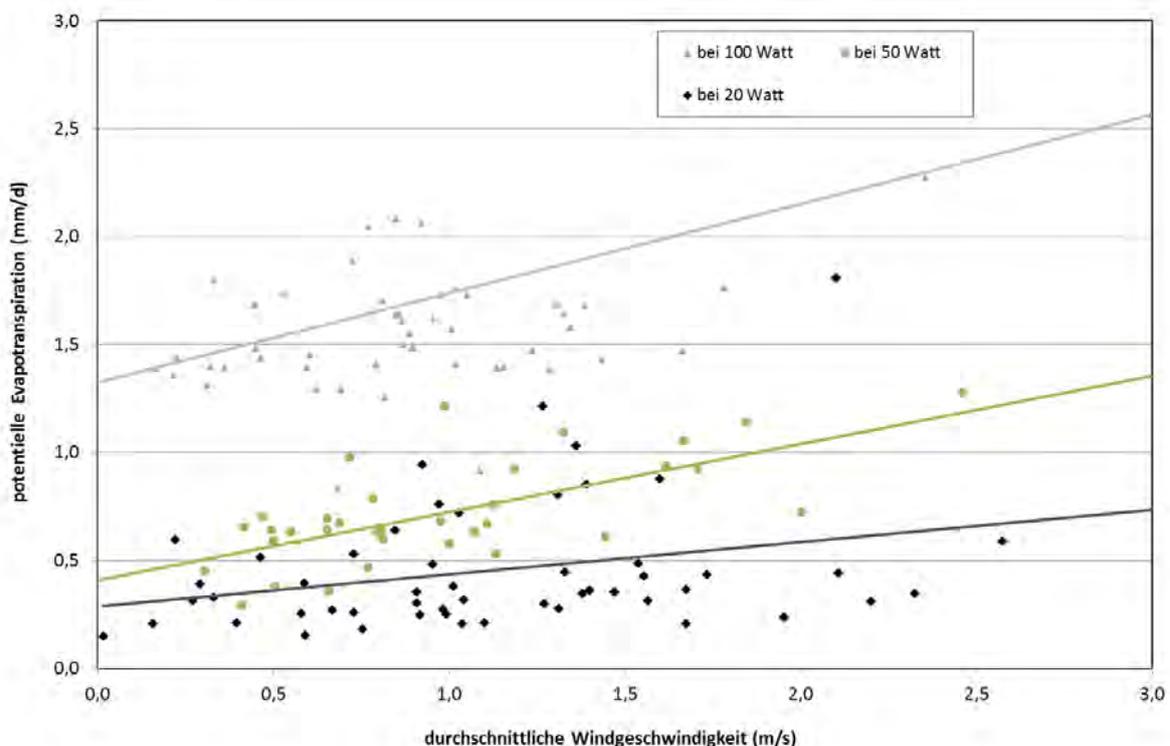
Eine noch geringere Auswirkung auf die Evapotranspiration als von der vorherrschenden Luftfeuchtigkeit geht von der Windgeschwindigkeit aus. Beim Vorliegen von Klimadaten guter Qualität kann jedoch ein Zusammenhang von Windgeschwindigkeit und Evapotranspiration gefunden werden. Diese Beziehung wird umso geringer, je höher die - dann alles bestimmende - Globalstrahlung wird.

Für Abbildung 59 wurden zunächst Tageswerte der Evapotranspiration für drei verschiedene Globalstrahlungsbereiche selektiert ( $20 \pm 2$  Watt,  $50 \pm 5$  Watt sowie  $100 \pm 10$  Watt). Diese Werte wurden dann als Funktion der mittleren Windgeschwindigkeit an diesem Tag abgetragen. So entstanden drei Datenreihen, die sich drei Strahlungsmengen zuordnen lassen. Die ermittelten Regressionen können deshalb auch als Iso-Strahlungs-Linien bezeichnet werden.

Zu erwarten ist dann, dass bei der geringsten Strahlung der Einfluss der Windgeschwindigkeit am größten und somit die Steigung der entsprechenden Iso-Linie am höchsten ist. Ab der Strahlungsmenge, bei der der Wind keine Rolle mehr spielt, müsste die Isolinie parallel zur x-Achse verlaufen oder nicht mehr ermittelbar sein.

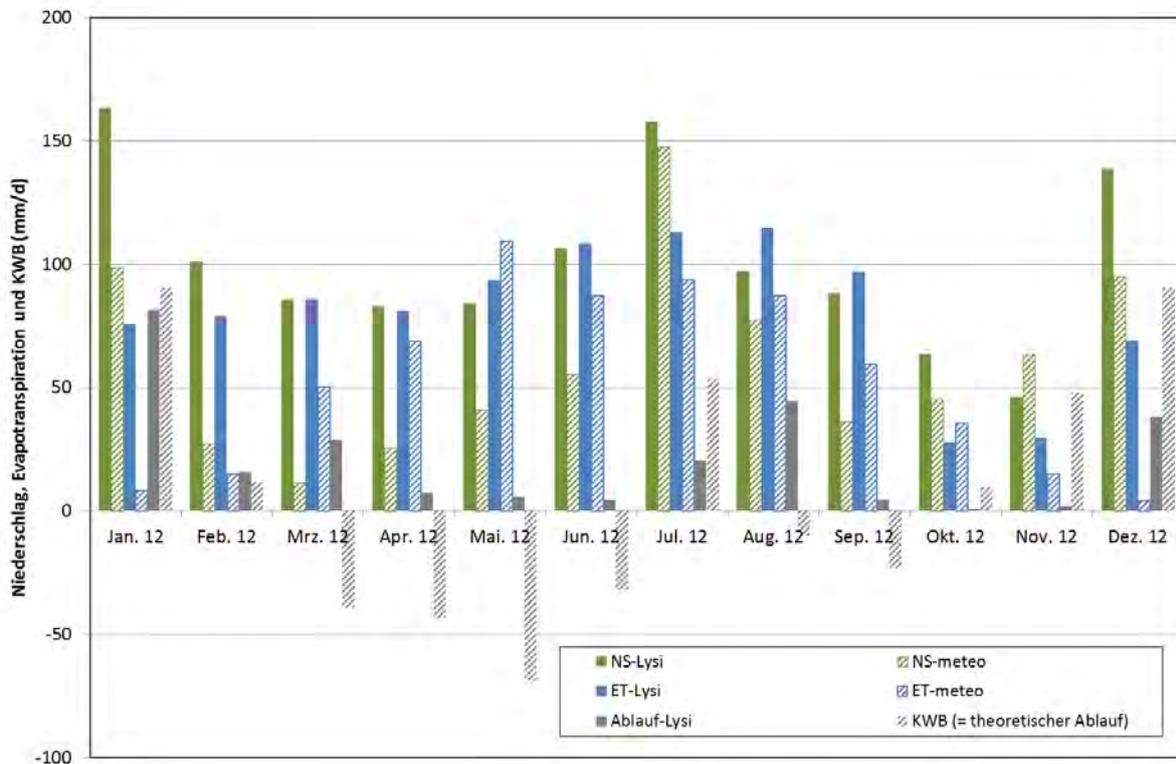
Alle drei Bereiche zeigen hier Korrelationen zwischen Windgeschwindigkeit und Verdunstung. Überraschenderweise ist dieser Zusammenhang bei der 100-Watt-Variante am deutlichsten. Die Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) sind aber bei allen Varianten unter 0,1 (geringe Korrelation) und deshalb auch in den Abbildungen nicht angezeigt.

Für höhere Strahlungswerte waren dann - erwartungsgemäß - keine Korrelationen mehr nachweisbar. Punkte, die weit von den Trendlinien abweichen, so wie bei der 50-Watt-Linie, können nur mit Messungenauigkeiten erklärt werden.



**Abbildung 59:** Potentielle Evapotranspiration als Funktion der Windgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Strahlung, 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.

Als Vorgriff auf Kapitel 6 zeigt Abbildung 60 einen Vergleich der Parameter der Wasserbilanz für das Jahr 2012: zum einen mit Lysimeter 2 ermittelt, zum anderen anhand der Daten der Klimastation. Da die potentielle Evapotranspiration stets größer ist als die tatsächliche, ergeben sich mit den Klimadaten teilweise Monate mit einer negativen klimatischen Wasserbilanz (KWB = Niederschlag NS abzüglich potentieller Verdunstung ET). Dass diese Wasserbilanz nur theoretischer Natur ist, wird daran ersichtlich, dass auch in diesen Monaten aus allen Lysimetern Sickerwasser abfloss.

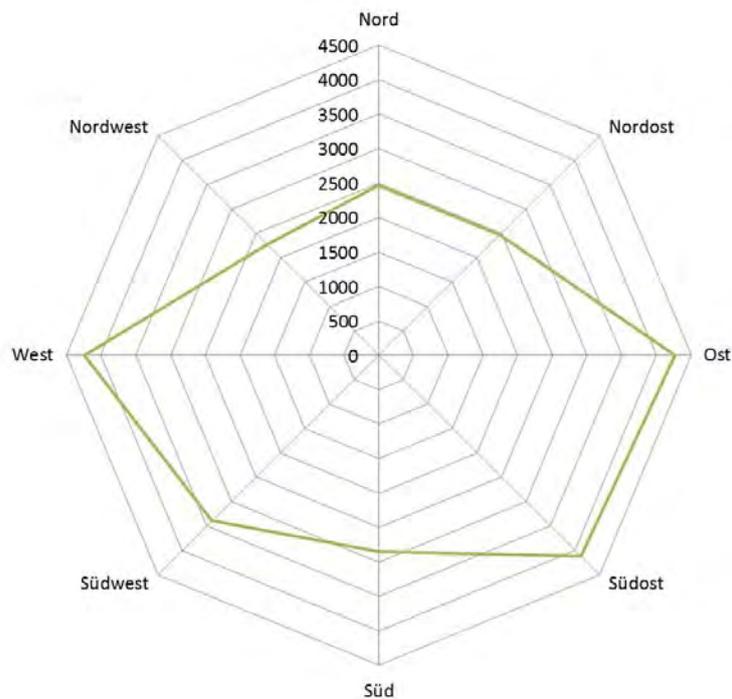


**Abbildung 60:** Monatswerte der Wasserhaushaltsparameter gemessen mit Lysimeter 2 (durchgängige Säulen) sowie mit Klimastation ermittelt (schraffierte Säulen), Jahr 2012, Lysimeterstation Colbitz.

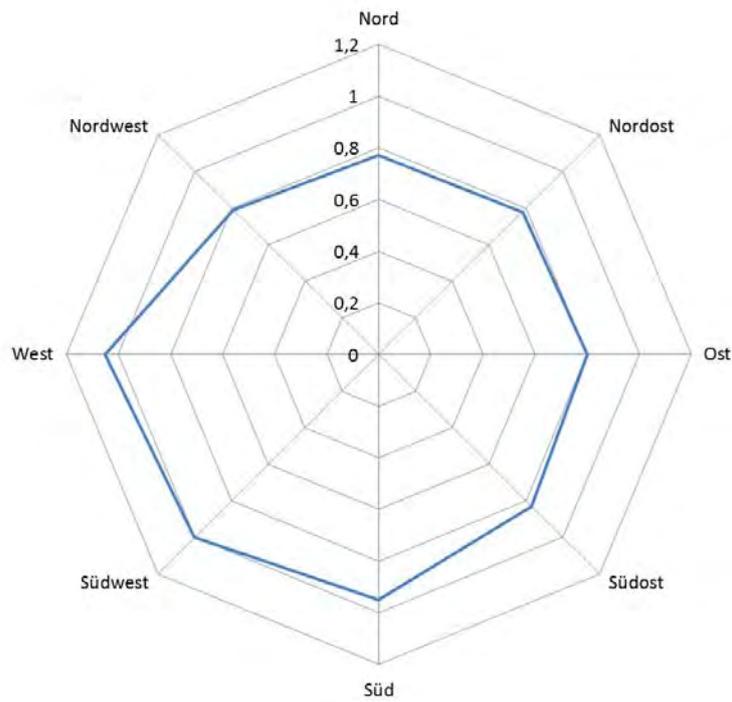
Die Abbildungen 61 bis 65 zeigen die Verteilung der Windrichtung sowie den (kaum sichtbaren) Zusammenhang von vorherrschender Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

Zwischen den einzelnen Jahren gibt es Schwankungen bei der Windrichtung. Während 2011 von Ostwind geprägt war, dominieren 2012 West und Südwest, 2013 West und Südost. Lediglich Nord und Süd lassen sich als Hauptwindrichtungen ausschließen.

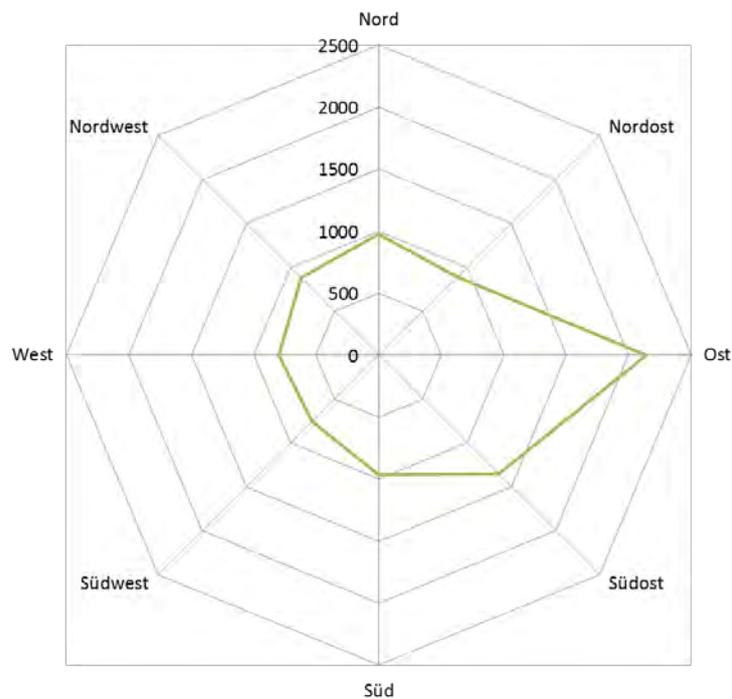
Es sollte jedoch nochmals ein direkter Abgleich vor Ort zum Ausschließen eines systematischen Fehlers erfolgen, da die Hauptwindrichtung in Colbitz mit West angegeben wird (WESTHUS 2013). Der die Lysimeterstation umgebende Baumbestand könnte jedoch abschwächend wirken.



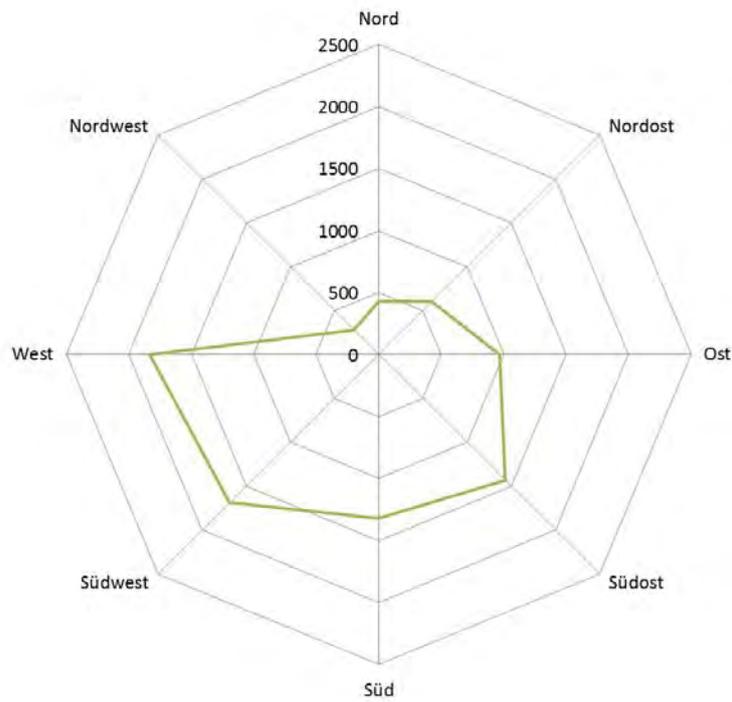
**Abbildung 61:** Windrichtung in allen Stunden der Jahre 2011, 2012 und 2013 Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.



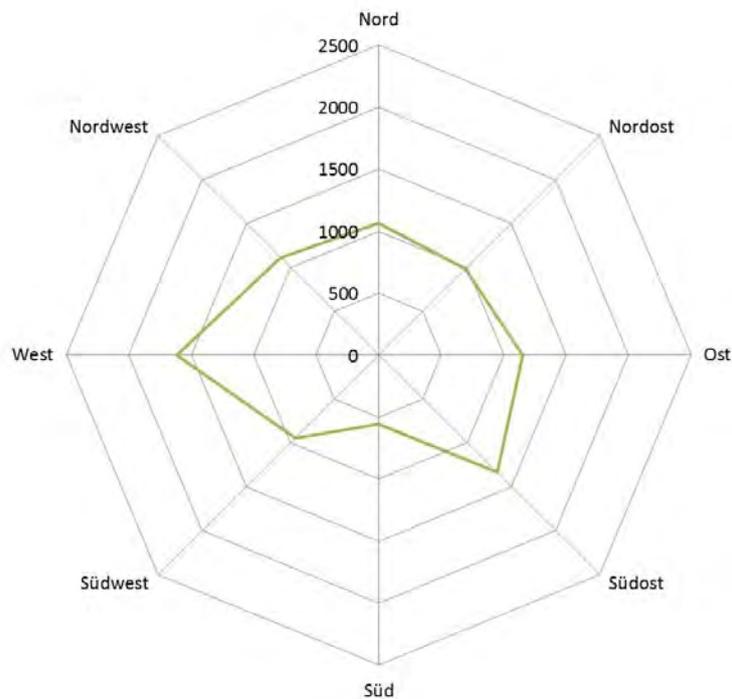
**Abbildung 62:** Mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) als Funktion der jeweiligen Windrichtung in den Jahren 2011, 2012 und 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 63:** Windrichtung in allen Stunden des Jahres 2011, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 64:** Windrichtung in allen Stunden des Jahres 2012, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 65:** Windrichtung in allen Stunden des Jahres 2013, Klimastation, Lysimeterstation Colbitz.

Die Klimastation ist eine wertvolle Ergänzung zur Lysimeterstation. Die Plausibilität der Lysimeterdaten kann mit den Wetterdaten immer geprüft werden. So kann eine Erfassung von abgesetzten Niederschlägen, die auch beim Vorliegen guter Lysimeterdaten teils nur zu erahnen sind, mit Hilfe der Wetterdaten bestätigt oder widerlegt werden. Auf die Verknüpfung von Klima- mit Lysimeterdaten wird in Kapitel 6 noch genauer eingegangen.

Durch die Berechnung von Kovarianzen ist eine genauere Ermittlung der Zusammenhänge der einzelnen Parameter möglich, die die Evapotranspiration antreiben. Weiterhin kann, korrekte Lysimeterdaten vorausgesetzt, aus potentieller und tatsächlicher Evapotranspiration ein bewuchsabhängiger Faktor für die verschiedenen Bepflanzungen bestimmt werden.

## 6. Ermittlung der Wasserbilanz der 12 Lysimeter seit der Neubepflanzung im April 2011 und erste Interpretationen

- Wie wirken sich Vegetationstypen „Besenheide“ und „Gräser“ auf den Gesamtabfluss aus?
- Sind erste Unterschiede erkennbar?

### 6.1 Parameterberechnung

Die Ermittlung der Niederschlagsmenge und der tatsächlichen Evapotranspiration erfolgt direkt aus der Masseänderung des Lysimeters (TLL 2001, HAGENAU und BORG 2015). Es wird die Annahme zugrunde gelegt, dass eine positive Masseänderung über ein Zeitintervall in der Regel durch Niederschlag bedingt ist, eine negative Masseänderung durch Evapotranspiration, sofern kein Sickerwasser aus dem Lysimeter ausgetreten ist. Wenn Sickerwasser anfällt, muss dieses zur Masseänderung addiert werden.

Wenn innerhalb eines Zeitintervalls beide Vorgänge auftreten, so überlagern sich diese zumindest zum Teil und können nicht vollständig getrennt werden. Deshalb ist ein besonders kurzes Intervall sehr gut geeignet, um die Ereignisse Niederschlag und Evapotranspiration möglichst genau zu trennen und die Genauigkeit zu erhöhen.

Andererseits rufen kürzere Intervalle aber auch zusätzliche Ungenauigkeiten durch Wind oder technisches Rauschen (Oszillationen) hervor. Obendrein wird die Datenmenge auf ein schwieriger zu handhabendes Maß erhöht. Deshalb erfolgte hier die Arbeit mit Stundenwerten sowie die anschließende Zusammenfassung zu Tages- und Monatswerten.

Um aus den vorhandenen Lysimeterdaten (Masseänderung und Sickerwassermenge) den Niederschlag und die Evapotranspiration zu ermitteln, wird die Wasserhaushaltsgleichung

$$\Delta W = P - ETa - S$$

umgestellt zu

$$P - ETa = \Delta W + S$$

mit:

$ETa$  ... tatsächliche Evapotranspiration,

$P$  ... Niederschlag,

$\Delta W$  ... Masseänderung = Änderung des Bodenwasserspeichers,

$S$  ... Sickerwassermenge.

Da es rein rechnerisch in einem Messintervall (hier eine Stunde) nur Niederschlag oder Verdunstung geben kann, gilt:

wenn  $\Delta W + S > 0$  dann ist  $ETa = 0$  und  $P = \Delta W + S$

wenn  $\Delta W + S < 0$  dann ist  $P = 0$  und  $-ETa = \Delta W + S$

wenn  $\Delta W + S = 0$  dann ist  $P = 0$  und  $ETa = 0$ .

Diese Methodik der Parameterberechnung weist folgende Besonderheiten auf:

1. Jedes Lysimeter erfasst „seine eigene“ Niederschlagsmenge. Wie im Folgenden gezeigt wird, haben diese Mengen Schwankungen von ca. 15% über alle zwölf Lysimeter. Die Mengen liegen alle weit oberhalb der mit den Regenmessern ermittelten und korrigierten Werte. Beide Tatsachen sind reell, denn die Lysimeter liegen relativ weit auseinander (der gegenseitige Abstand von Lysimetermitte zu Lysimetermitte beträgt 4,2 m bzw. 4,3 m) und sind unterschiedlich bewachsen. Somit empfangen sie auch unterschiedliche Niederschlagsmengen. Außerdem werden abgesetzte Niederschläge, die beim Regenmesser nicht erkennbar sind, sowie Interzeption von den Lysimetern erfasst.
2. Wassermengen von abgesetzten Niederschlägen und Interzeption, die direkt von Pflanzenoberfläche oder Boden verdampfen, werden vom Lysimeter als Gewichtsabnahme erfasst und rechnerisch der Evapotranspiration zugeordnet. Dies ist laut Definition korrekt (HILLEL 1998).
3. Für beide Parameter werden deshalb höhere Beträge ermittelt als mit der Berechnung mit Hilfe eines Regenmessers. Die Differenzen sind jedoch gleich, so dass sich für die gesamte Wasserbilanz kein Unterschied ergibt.

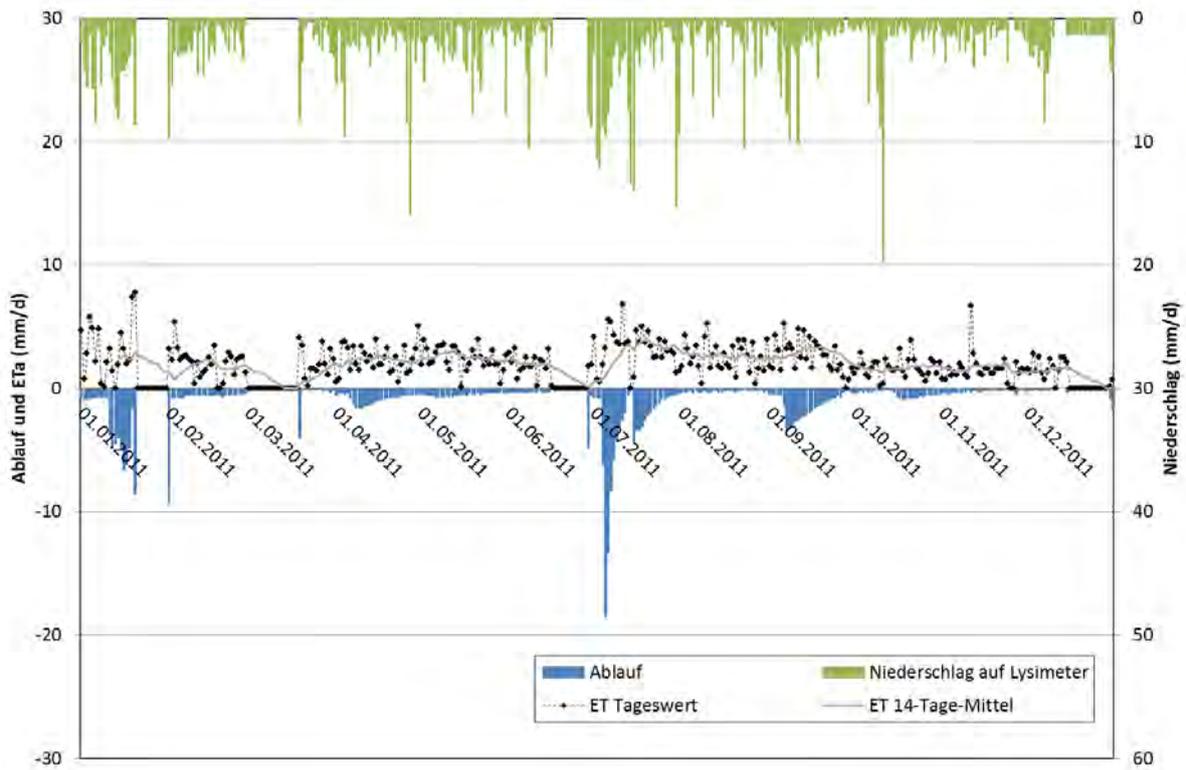
## 6.2 Wasserbilanzen der einzelnen Lysimeter

Wie unter *Parameterberechnung* beschrieben erfolgte zunächst die Arbeit mit Stundenwerten und danach die anschließende Zusammenfassung zu Tages- und Monatswerten. Mithilfe der Tageswerte wurden Verlaufsdarstellungen für alle Parameter für jedes Lysimeter jeweils für die Jahre 2011, 2012 und 2013 erzeugt. Darüber hinaus wurden Monats- und Jahresbilanzen für alle Lysimeter erstellt und in einem weiteren Schritt die Bilanzen für Lysimeter-Gruppen (1-3; 4-6; 7-9; 10-12) gebildet, die sich in Boden und Bepflanzung unterscheiden. Ähnlich war bereits in Kapitel 3 vorgegangen worden.

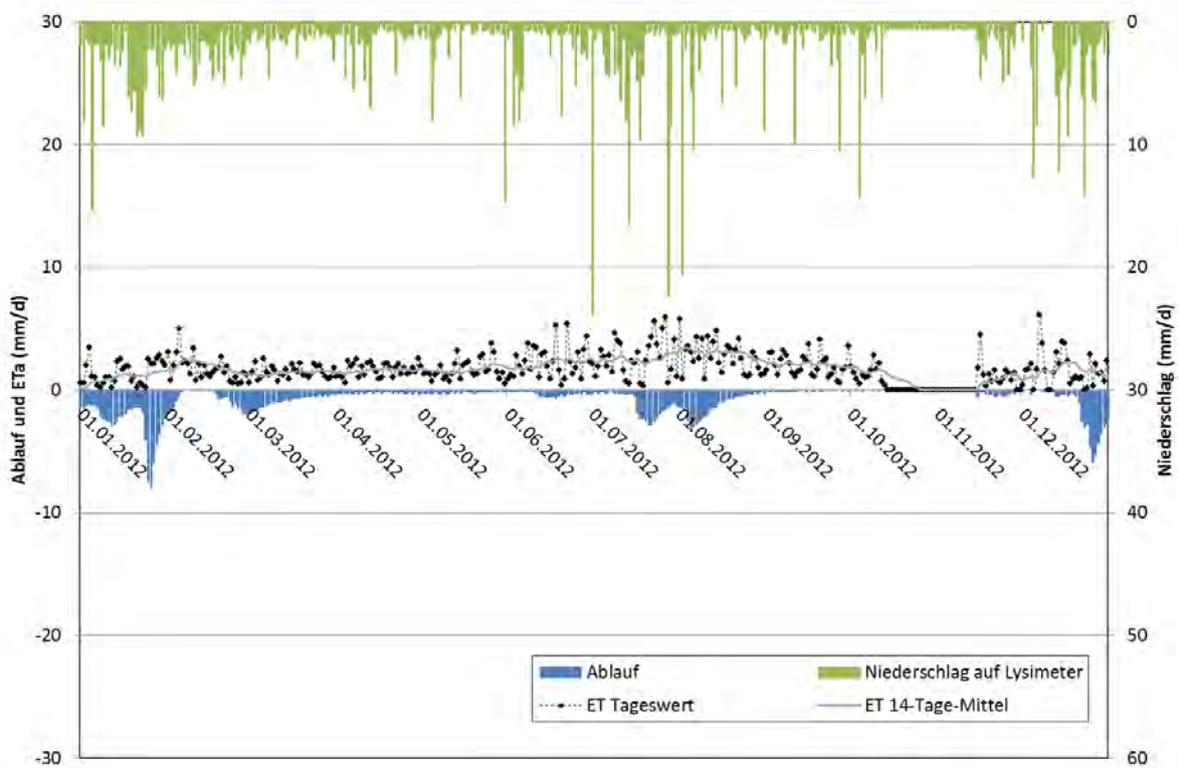
Exemplarisch werden zunächst sämtliche Abbildungen für die Lysimeter 1 bis 3, also für die erste der eingeteilten Gruppen, veranschaulicht und interpretiert. Da sich keine grundsätzlich verschiedenen Zusammenhänge und Schlussfolgerungen zu den Lysimetern 4 bis 12 ergaben, werden die entsprechenden Abbildungen für diese Lysimeter ausschließlich in der Anlage 1 gezeigt. Die Auswertung der Monats- und Jahresbilanzen erfolgt wiederum vollumfänglich.

### *Lysimeter 1 bis 3*

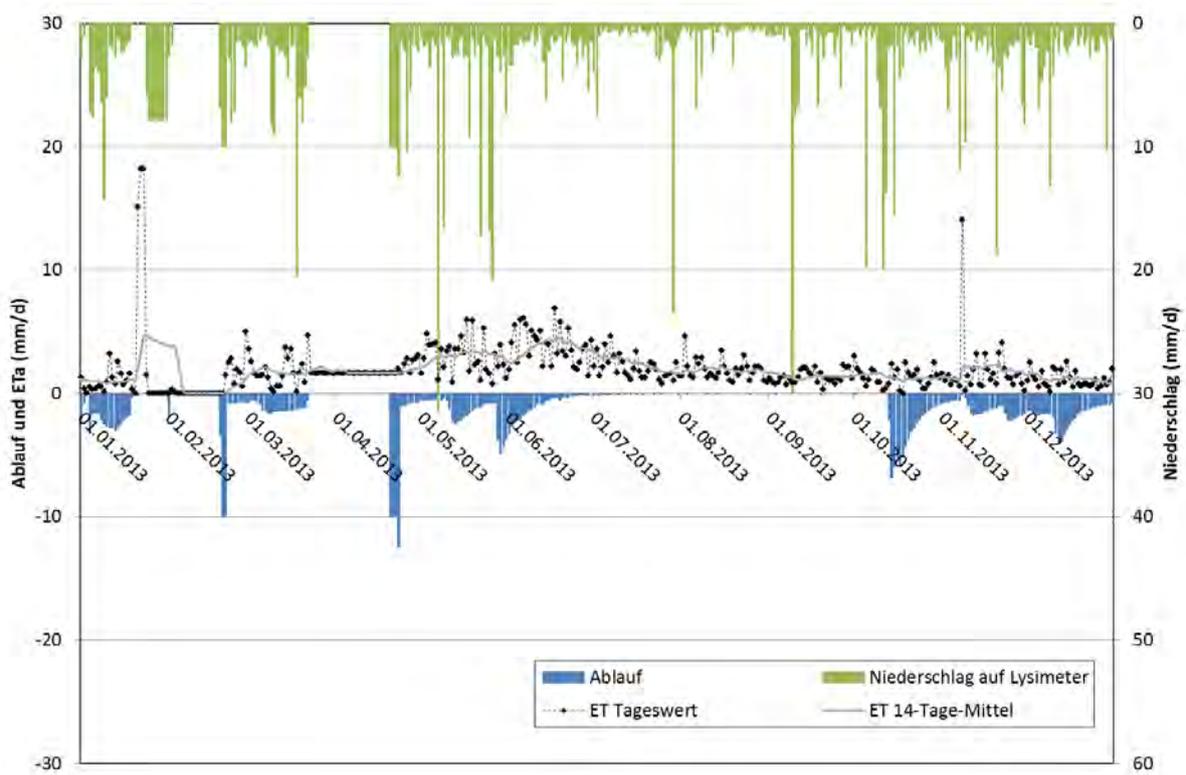
Die Abbildungen 66 bis 74 zeigen die Verläufe der Parameter Niederschlag, Evapotranspiration und Ablauf der Lysimeter 1 bis 3 jeweils für die Jahre 2011, 2012 und 2013. Für die Evapotranspiration wird zusätzlich zu den Tageswerten das 14-Tage-Mittel gezeigt. Bereits auf den ersten Blick wird bei allen neun Abbildungen ersichtlich, dass jahreszeitliche, typische Verläufe bei der Evapotranspiration leider nicht deutlich erkennbar sind. Dies ist den beschriebenen Fehlern bzw. Schwächen bei den Wägedaten geschuldet. So sind die Abschnitte ohne jeglichen Niederschlag oder mit täglich gleichen Niederschlagsmengen, so wie Ende 2011, auf fehlenden Daten zurückzuführen.



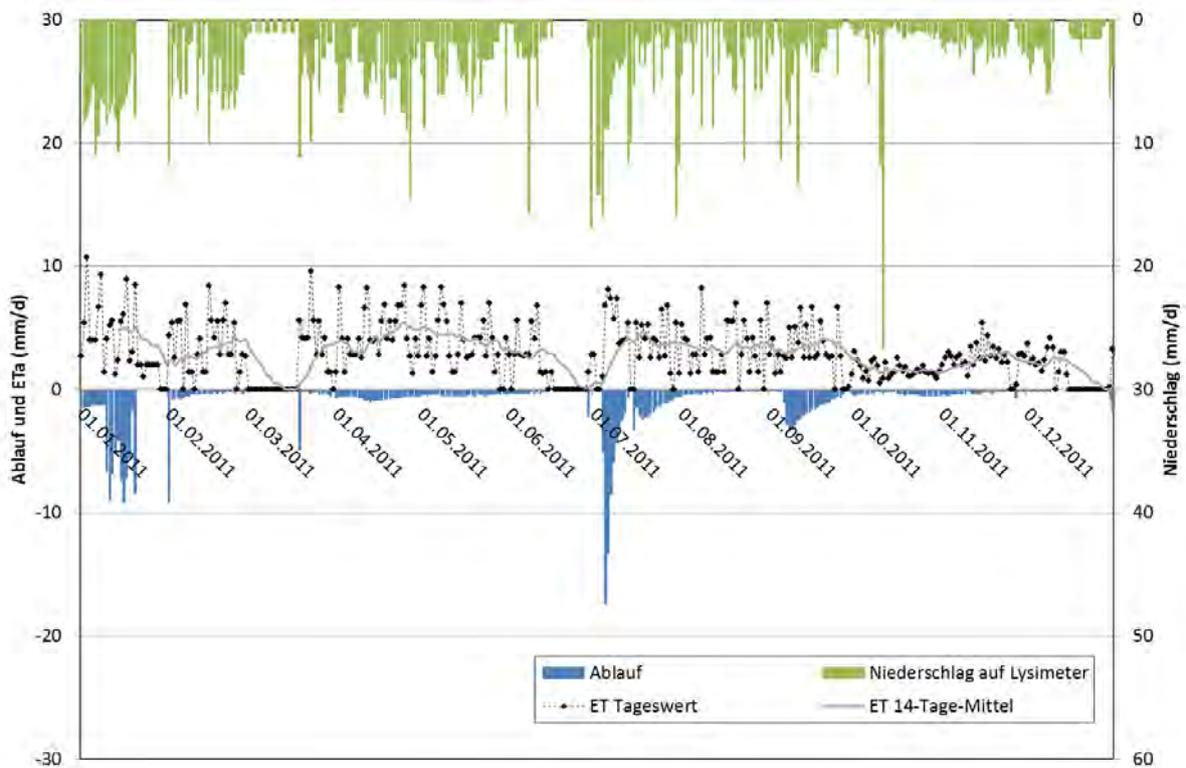
**Abbildung 66:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 1, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



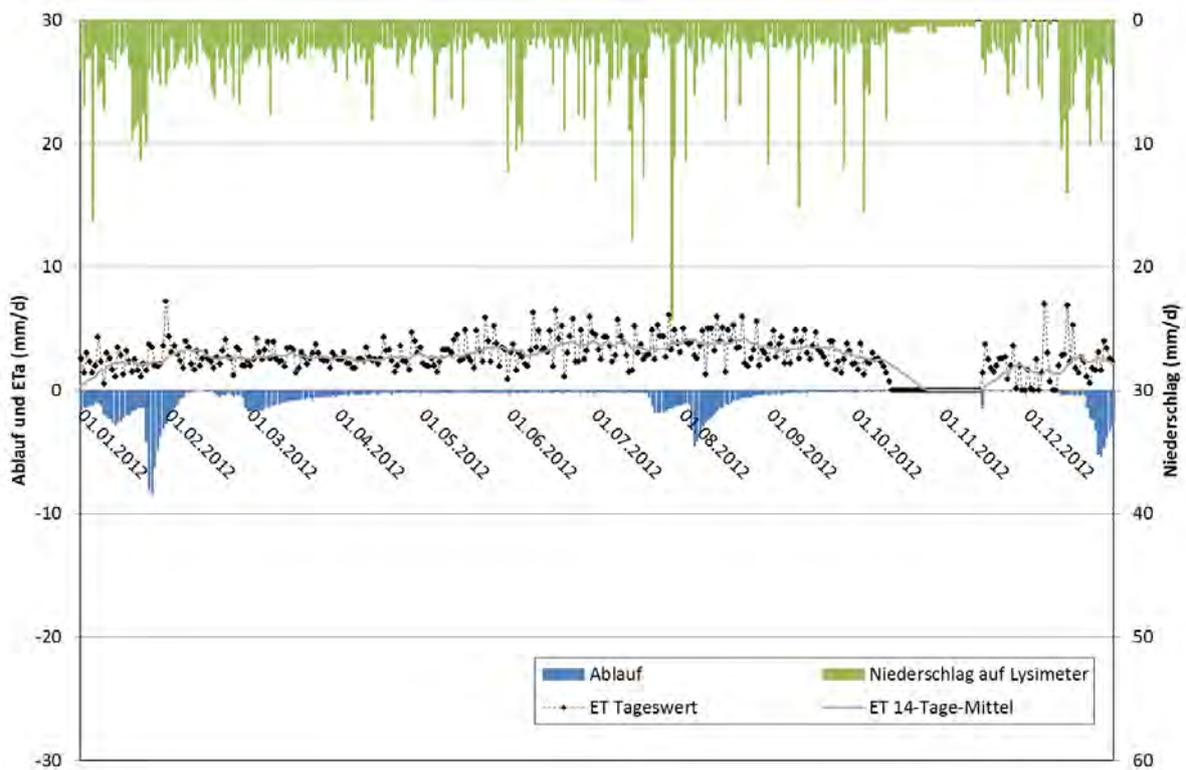
**Abbildung 67:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 1, 2012, Lysimeterstation Colbitz.



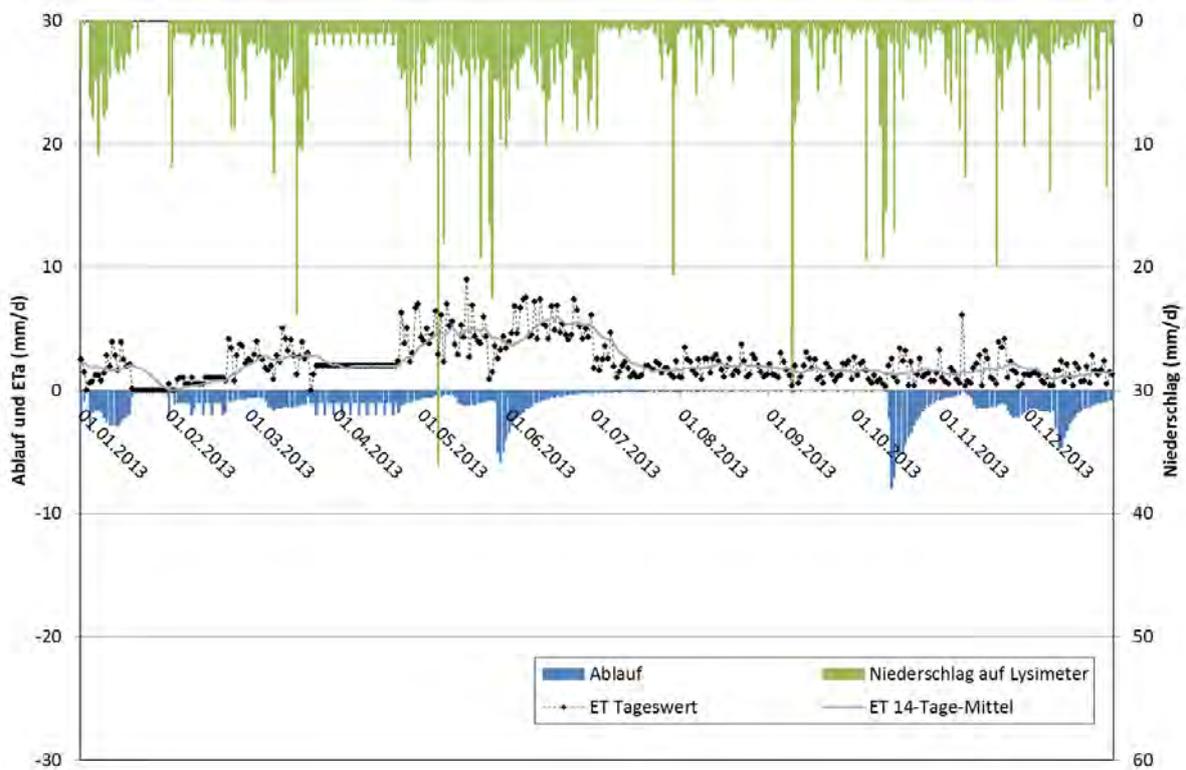
**Abbildung 68:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 1, 2013, Lysimeterstation Colbitz.



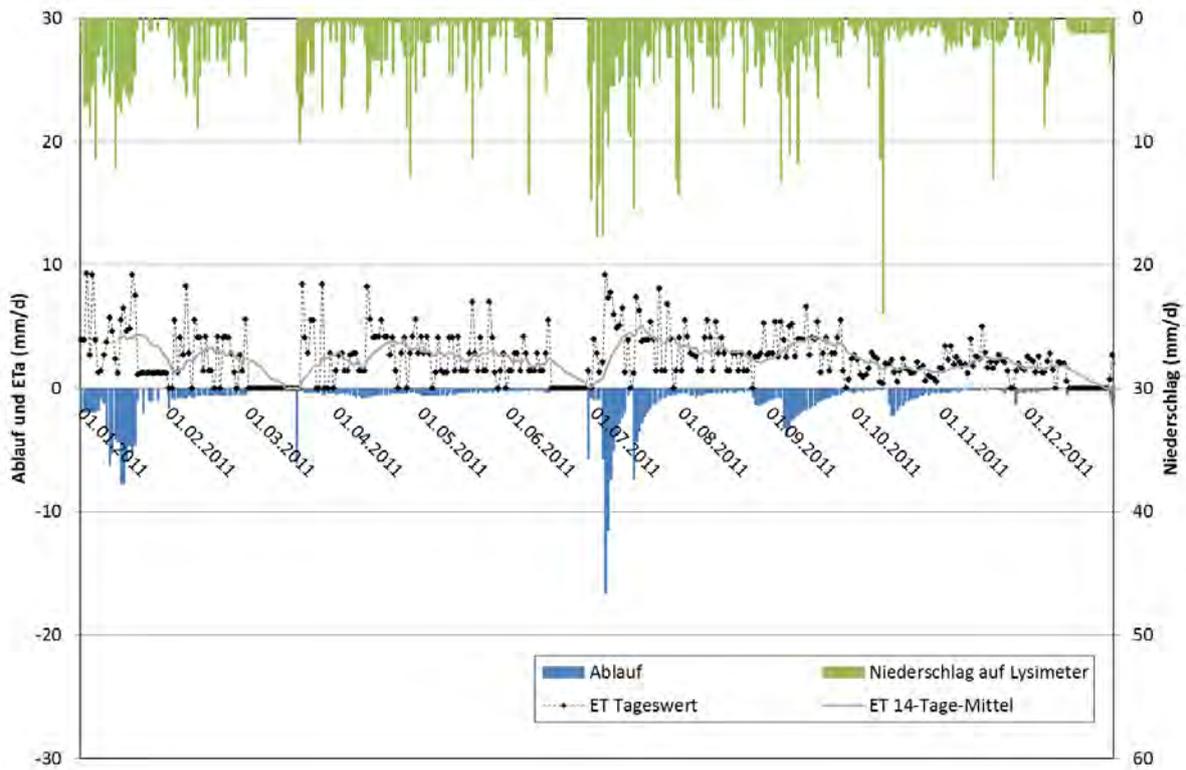
**Abbildung 69:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 2, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



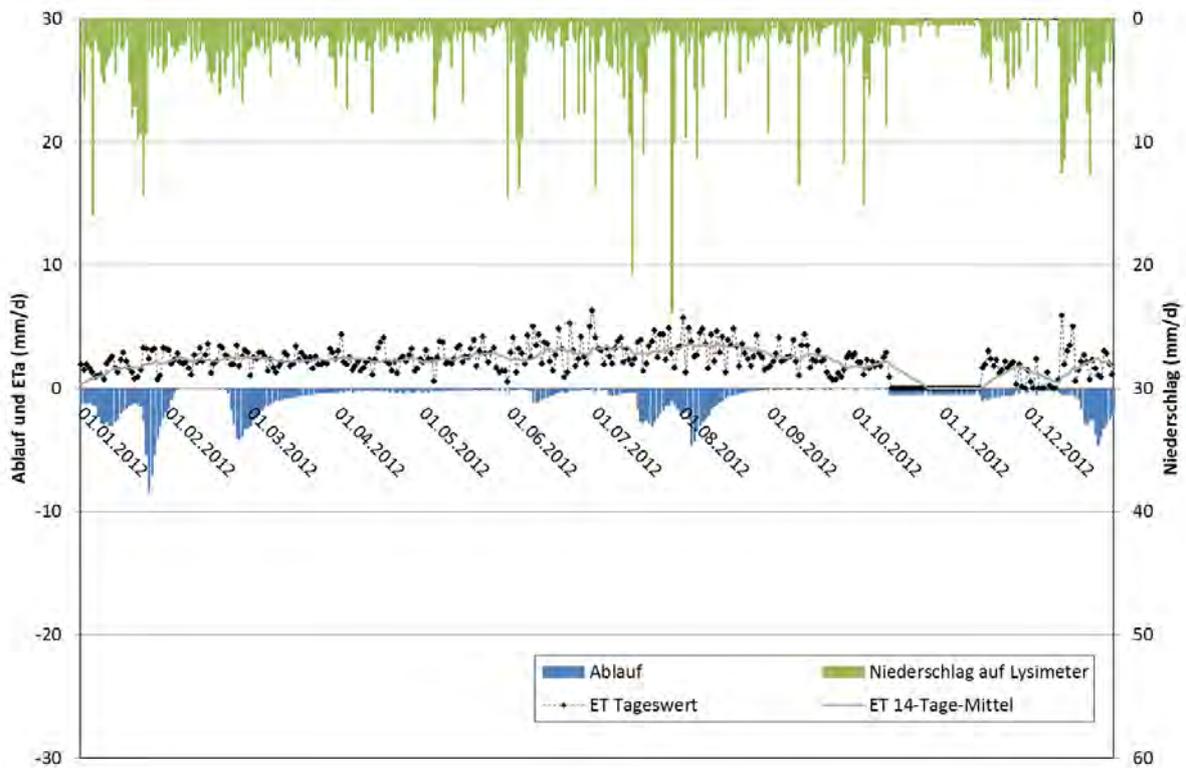
**Abbildung 70:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 2, 2012, Lysimeterstation Colbitz.



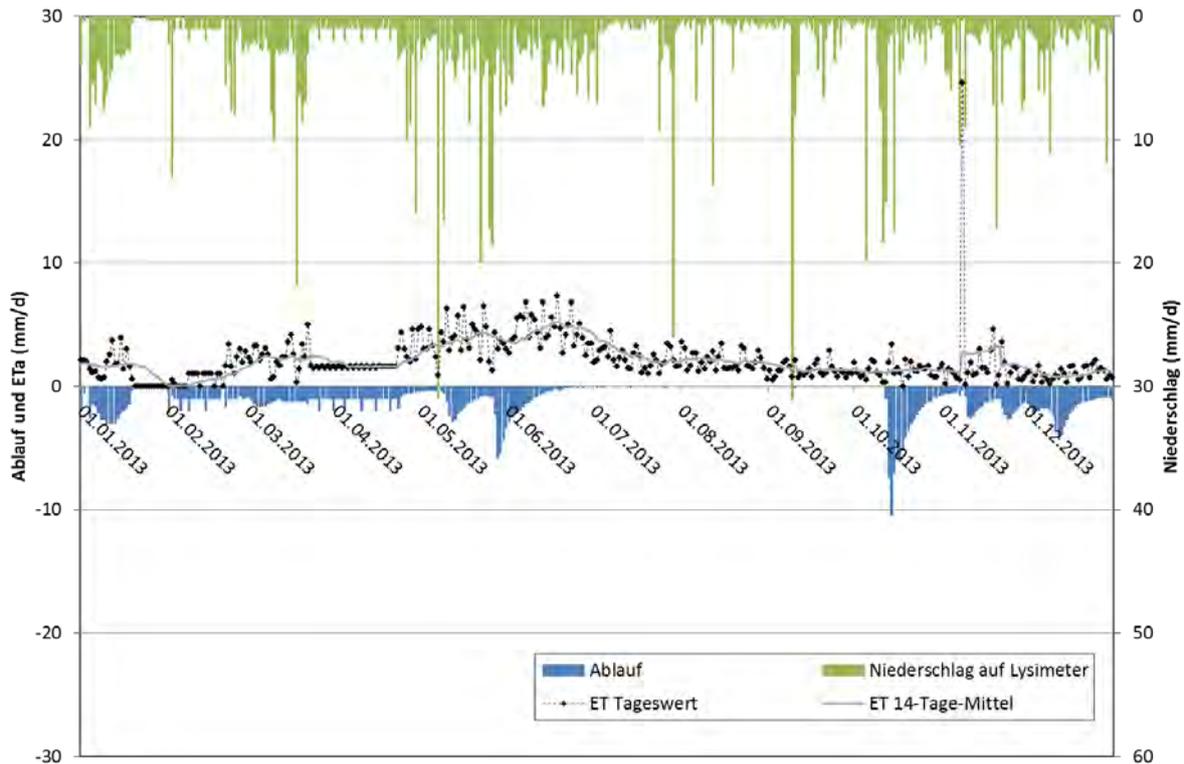
**Abbildung 71:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 2, 2013, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 72:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 3, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 73:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 3, 2012, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 74:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 3, 2013, Lysimeterstation Colbitz.

Nachdem die Stundenwerte manuell korrigiert worden waren, erfolgte keine weitere Korrektur der Tageswerte, so dass sich in den Abbildungen 66 bis 74 teils zu hohe Tageswerte der Evapotranspiration finden. Ursache für die zu hohen Werte in den Wintermonaten könnte lateral ablaufendes Schmelzwasser nach Schneeeauflage sein. Deshalb sei hier noch einmal auf die Wichtigkeit der Beobachtung der Schneehöhe hingewiesen, wie sie bis Februar 1999 stattgefunden hatte. Die Niederschlagsform (Regen, Schnee etc.) wird nach wie vor dokumentiert, die Schneehöhe jedoch nicht mehr.

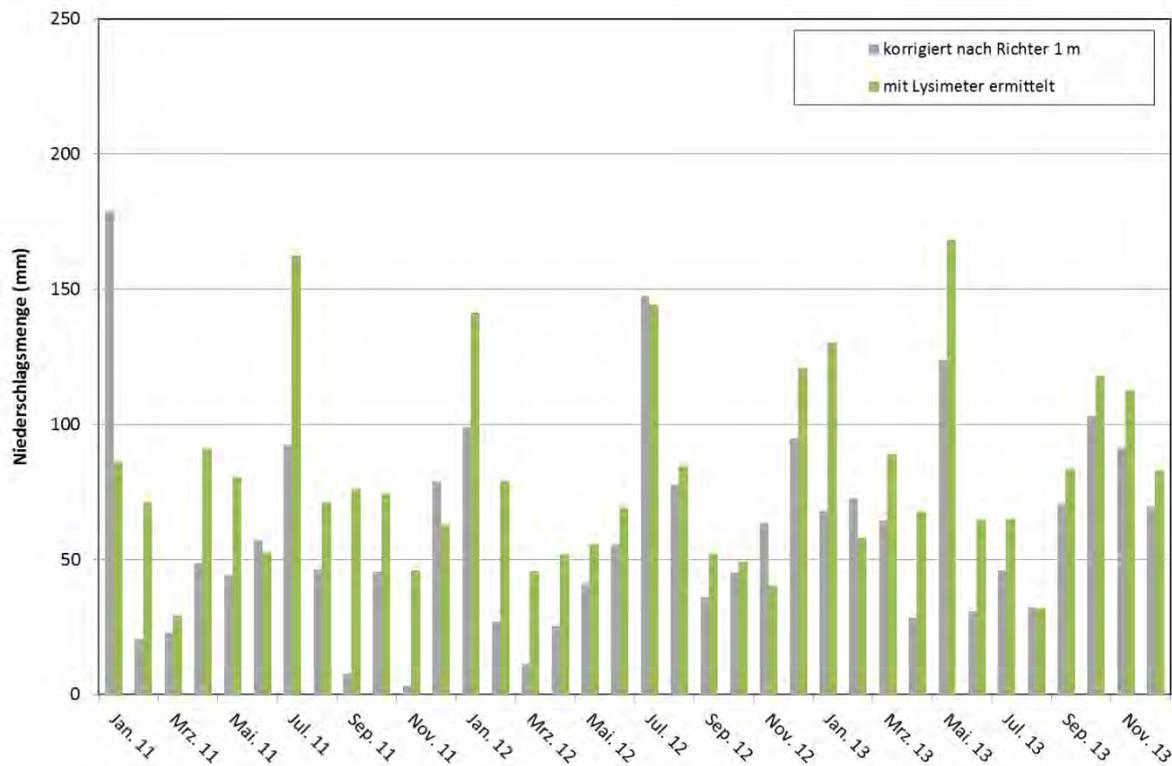
Abbildung 75 zeigt für Lysimeter 1 einen Vergleich der Monatswerte der Niederschläge für die Jahre 2011, 2012 und 2013, und zwar einerseits die mit dem Lysimeter ermittelten und andererseits die korrigierten Niederschläge, wie sie mit dem Niederschlagsmesser erfasst und in Kapitel 4 schon ausführlich beschrieben wurden.

In (fast) allen Monaten wird mit allen Lysimetern deutlich mehr Niederschlag als mit dem Regenmesser erfasst. Dies liegt zum einen an den beschriebenen Fehlern (hier hauptsächlich Oszillationen), die zu einer deutlichen Überschätzung der Niederschlagsmengen führen. Zum anderen wird mit Regenmessern nach Hellmann teils deutlich zu wenig Niederschlag erfasst, was besonders abgesetzte Niederschläge betrifft (siehe dazu auch Kapitel 4).

Einzigste Ausnahme - für alle Lysimeter - bildet der Monat Januar 2011. In jenem Monat war auf eine geschlossene und teils verharschte Schneedecke neuer Regenniederschlag gefallen, der von den Lysimetern nicht erfasst werden konnte. Entweder ist der Niederschlag lateral abgefließen oder die Schneedecke war lysimeterübergreifend so

verharscht, dass das in den Harsch eindringende Regenwasser nicht zu einer messbaren Erhöhung der Lysimetergewichte führte (vgl. Kapitel 4, Niederschläge).

Momentan wird, u. a. am Lehrstuhl für Landeskultur und Kulturtechnik, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften an der Martin-Luther-Universität in Halle, an Verfahren gearbeitet, bei dem die Regenmesser nur noch als Taktgeber für die Messung der Niederschlagsmessung mithilfe von Lysimetern genutzt werden sollen (FISCHER 2013, KIEFFER 2014). Das bedeutet, dass der Regenmesser lediglich anzeigt, ob es regnet oder nicht. Die Quantität der Niederschläge wird dann mit dem Lysimeter ermittelt. Die der Abbildung 75 entsprechenden Darstellungen für alle weiteren Lysimeter befinden sich im Anhang 2.



**Abbildung 75:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 1 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.

Die folgenden Tabellen 5 bis 13 zeigen die Wasserbilanzen der Lysimeter 1 bis 3 für jeden Monat in den Jahren 2011, 2012 und 2013, wobei NS den Niederschlag bezeichnet, ET die Evapotranspiration und  $\Delta Sp$  die Änderung im Bodenwassergehalt.

**Tabelle 5:** Wasserbilanz 2011, Lysimeter 1, Lysimeterstation Colbitz.

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	86	71	29	91	80	53	162	71	76	74	46	63	<b>903</b>
ET	62	58	28	71	76	34	100	80	79	53	46	27	<b>714</b>
Ablauf	58	26	6	26	16	10	97	7	41	15	7	4	<b>313</b>
$\Delta Sp$	-34	-13	-4	-6	-11	8	-35	-16	-44	7	-7	32	<b>-124</b>

**Tabelle 6:** Wasserbilanz 2012, Lysimeter 1, Lysimeterstation Colbitz.

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	141	79	45	52	56	69	144	84	52	49	40	121	<b>932</b>
ET	43	51	45	50	52	69	82	86	62	17	19	51	<b>626</b>
Ablauf	82	20	28	8	7	10	35	39	3	0	6	44	<b>281</b>
$\Delta Sp$	17	8	-28	-6	-4	-11	28	-40	-12	31	16	26	<b>25</b>

**Tabelle 7:** Wasserbilanz 2013, Lysimeter 1, Lysimeterstation Colbitz.

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	130	58	89	68	168	64	65	32	83	118	112	83	<b>1070</b>
ET	71	17	55	56	93	117	65	59	40	40	56	35	<b>704</b>
Ablauf	39	31	26	48	47	28	2	0	0	59	38	56	<b>373</b>
$\Delta Sp$	20	10	7	-37	28	-80	-2	-28	43	19	19	-8	<b>-8</b>

**Tabelle 8:** Wasserbilanz 2011, Lysimeter 2, Lysimeterstation Colbitz.

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	144	135	67	148	116	67	235	98	92	75	64	66	<b>1306</b>
ET	116	100	51	132	120	48	116	108	92	48	75	40	<b>1046</b>
Ablauf	84	20	8	21	14	6	90	7	38	12	9	4	<b>312</b>
$\Delta Sp$	-56	15	7	-6	-18	13	29	-17	-37	15	-19	22	<b>-52,1</b>

**Tabelle 9:** Wasserbilanz 2012, Lysimeter 2, Lysimeterstation Colbitz.

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	163	101	86	83	84	107	158	97	88	63	46	139	<b>1215</b>
ET	76	79	86	81	94	108	113	115	97	28	29	69	<b>975</b>
Ablauf	82	16	29	8	6	5	21	45	5	1	2	38	<b>255</b>
$\Delta Sp$	6	7	-29	-6	-16	-7	24	-63	-13	35	15	32	<b>-15</b>

**Tabelle 10:** Wasserbilanz 2013, Lysimeter 2, Lysimeterstation Colbitz.

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	84	83	135	73	226	138	68	38	87	123	120	93	<b>1268</b>
ET	33	36	77	81	134	165	59	62	49	48	50	41	<b>832</b>
Ablauf	40	32	36	38	41	29	4	2	1	60	34	59	<b>373</b>
$\Delta Sp$	11	15	23	-45	51	-56	6	-25	38	15	36	-6,3	<b>62,1</b>

**Tabelle 11:** Wasserbilanz 2011, Lysimeter 3, Lysimeterstation Colbitz.

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	131	86	50	101	73	60	198	83	107	76	62	61	<b>1087</b>
ET	108	77	38	93	79	36	127	86	102	47	63	30	<b>886</b>
Ablauf	81	18	11	15	12	10	92	16	40	21	6	5	<b>326</b>
$\Delta Sp$	-57	-10	1	-7	-18	14	-21	-20	-34	9	-8	26	<b>-125</b>

**Tabelle 12:** Wasserbilanz 2012, Lysimeter 3, Lysimeterstation Colbitz.

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	153	94	70	69	73	100	155	92	68	62	48	119	<b>1104</b>
ET	59	71	71	69	77	95	96	98	68	26	26	50	<b>805</b>
Ablauf	82	27	30	7	5	10	38	41	1	9	16	41	<b>307</b>
$\Delta Sp$	13	-4	-31	-7	-8	-5	21	-47	-1	27	6	28	<b>-8</b>

**Tabelle 13:** Wasserbilanz 2013, Lysimeter 3, Lysimeterstation Colbitz.

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	79	66	113	73	198	101	75	44	79	120	114	84	<b>1145</b>
ET	34	29	68	61	117	139	69	63	38	40	64	32	<b>755</b>
Ablauf	39	31	39	32	50	23	0	0	0	69	43	57	<b>383</b>
$\Delta Sp$	6	6	5	-20	30	-61	6	-19	41	11	7	-4	<b>7</b>

### Handwägung

Die Handwägung wird bei allen Lysimetern täglich durchgeführt und dokumentiert. Hierbei werden die aktuellen Gewichte der Lysimeter an den Schalgewichtswaagen ermittelt und aufgeschrieben. Mit nur einem Wert pro Tag werden bei der Parameterberechnung sowohl Niederschlag als auch Evapotranspiration stark unterschätzt. Dies zeigen die Wasserbilanzen in den Tabellen 14 und 15 beispielhaft für Lysimeter 1.

**Tabelle 14:** Wasserbilanz 2011, Lysimeter 1, Handwägung, Lysimeterstation Colbitz.

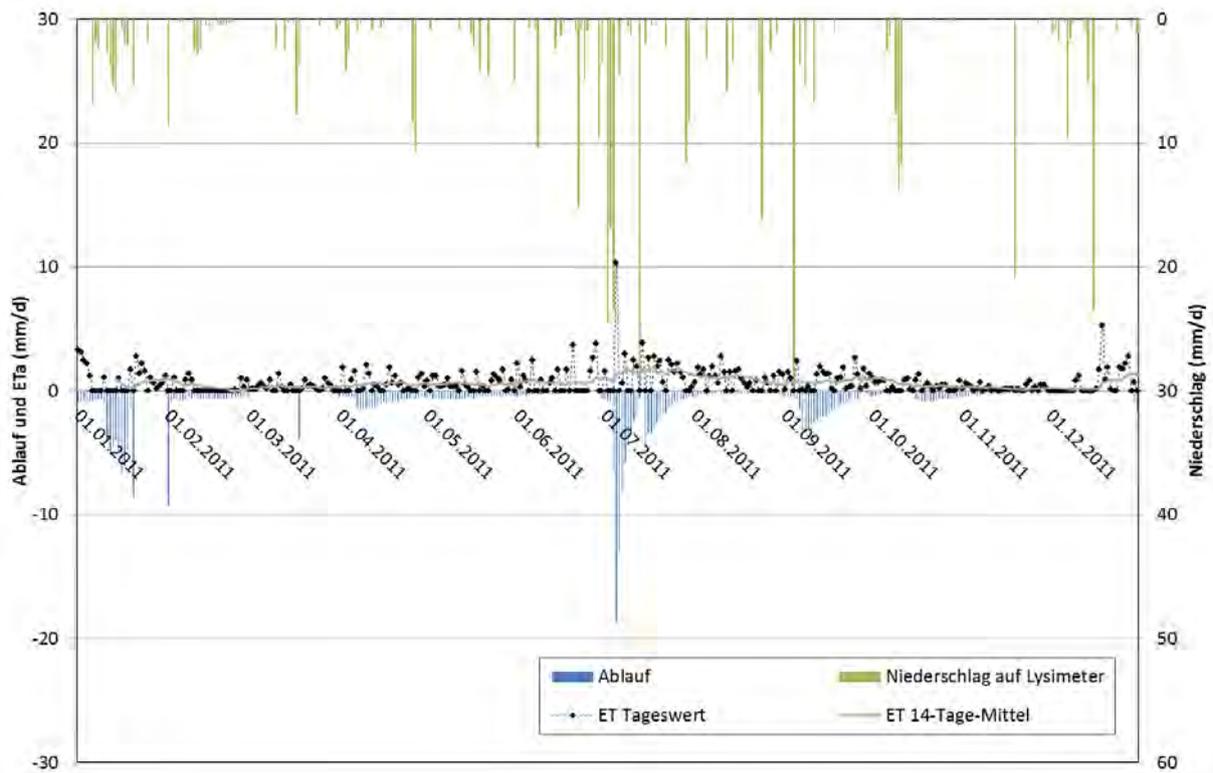
Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	41	20	18	29	19	52	126	38	47	38	21	48	<b>497</b>
ET	28	7	10	17	18	25	46	29	26	13	7	22	<b>248</b>
Ablauf	58	26	6	26	16	6	97	8	41	15	7	4	<b>309</b>
$\Delta Sp$	-45	-12	3	-14	-15	21	-17	2	-21	11	7	22	<b>-57</b>

**Tabelle 15:** Wasserbilanz 2012, Lysimeter 1, Handwägung, Lysimeterstation Colbitz.

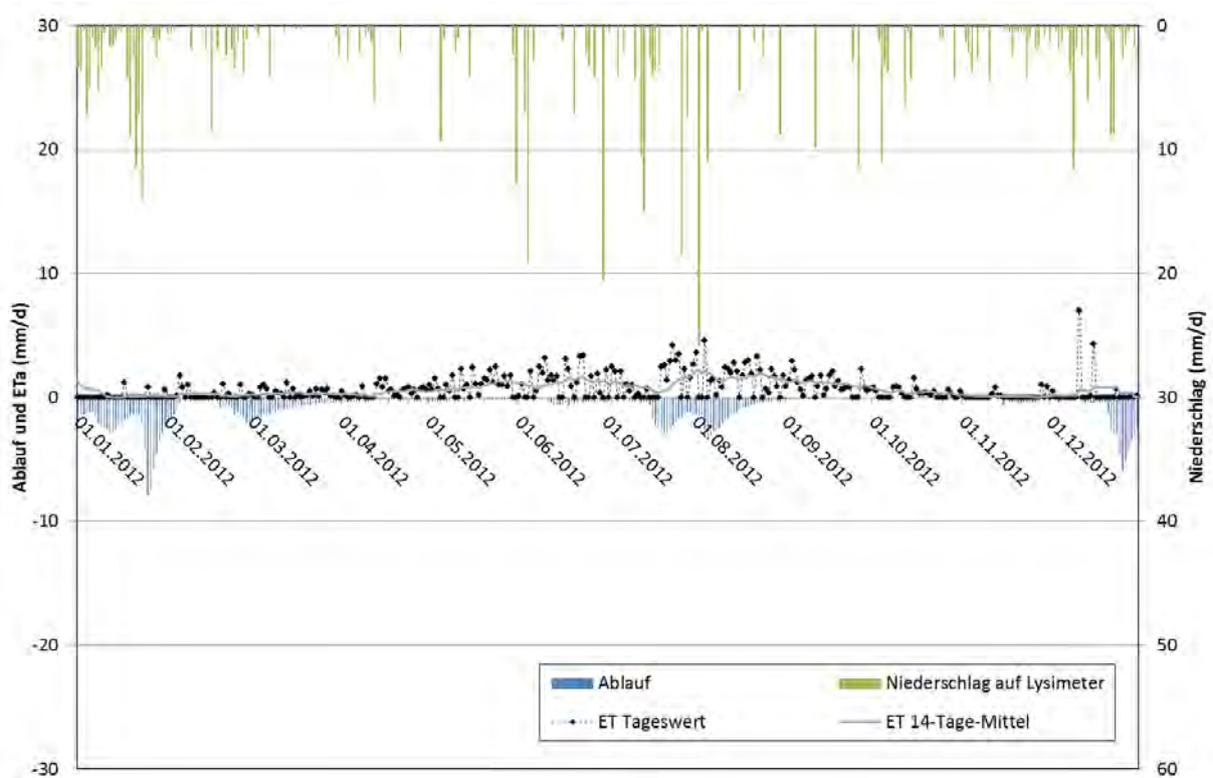
Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	91	30	9	16	33	68	76	55	25	37	30	64	<b>534</b>
ET	3	7	10	14	31	36	39	48	31	10	3	13	<b>245</b>
Ablauf	82	24	28	8	7	10	35	39	3	0	6	44	<b>285</b>
$\Delta Sp$	6	-1	-28	-6	-6	22	2	-31	-9	26	21	8	<b>4</b>

Bei der Handwägung ist, da sie nur einmal täglich erfolgt, mit einer geringeren Anzahl an Oszillationen und dadurch mit weniger Schwankungen und somit harmonischeren, Verläufen zu rechnen.

Die Abbildungen 76 und 77 zeigen aber, dass diese Erwartungen leider nicht erfüllt werden. Ein „Verschneiden“ der Daten von automatischer und Handwägung bzw. ein Auffüllen der Datenlücken mit Hilfe der Handwägungsdaten könnte grundsätzlich die Qualität der berechneten Parameter verbessern.



**Abbildung 76:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 1, Handwägung, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 77:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 1, Handwägung, 2012, Lysimeterstation Colbitz.

### 6.3 Wasserbilanzen Lysimeter 1 bis 12

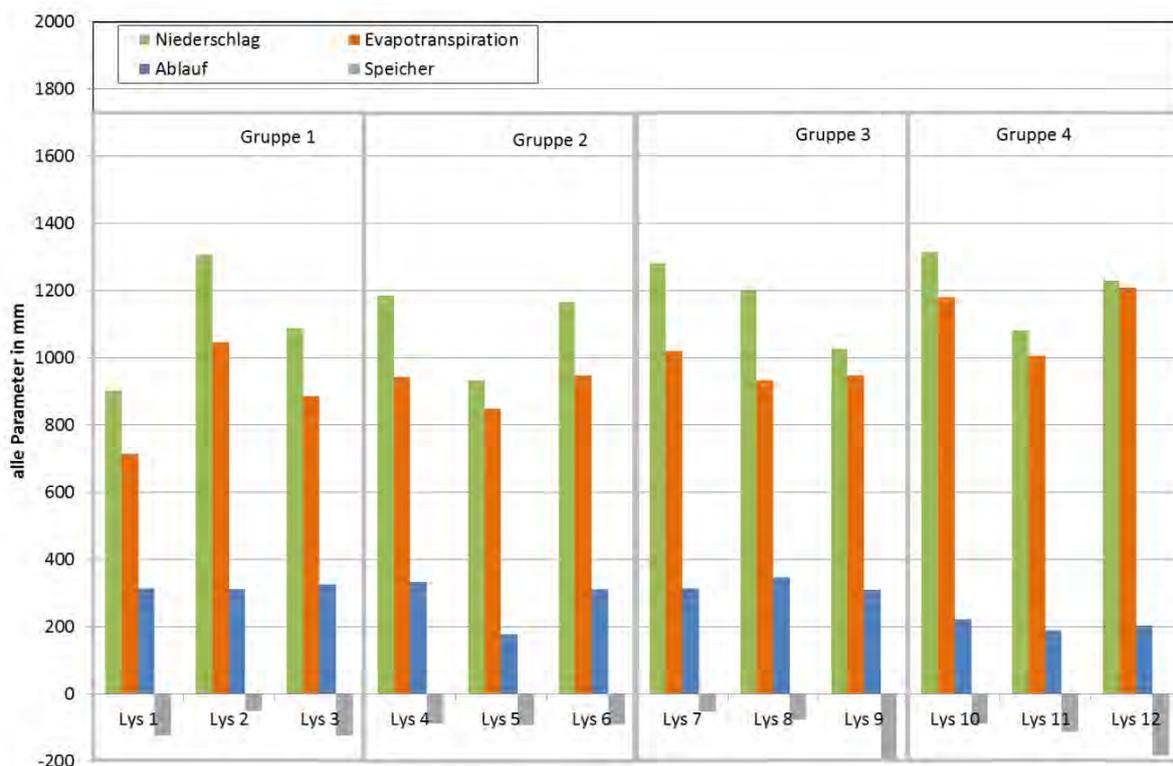
Zunächst zeigen die Abbildungen 78, 79 und 80 die Jahreswerte aller Parameter des Wasserhaushalts für alle 12 Lysimeter, wobei zusätzlich zu den bisherigen Abbildungen hier auch die Änderung im Bodenwasserspeicher dargestellt ist.

Abbildungen 81, 82 und 83 zeigen die gleichen Parameter für die Lysimeter, die hier in Gruppen zusammengefasst sind. Gruppe 1: Lysimeter 1 bis 3, Gruppe 2: Lysimeter 4 bis 6, Gruppe 3: Lysimeter 7 bis 9, Gruppe 4: Lysimeter 10 bis 12. Diese Zusammenfassung ergibt sich aus den Vorgaben gemäß Kapitel 1.4 und vereint die Lysimeter mit jeweils gleichen Böden bzw. Bewuchs.

Gruppe 1 und Gruppe 2 - also Lysimeter 1 bis Lysimeter 6 - unterscheiden sich weder in Boden noch Bewuchs (podsolige Braunerde auf Geschiebedecksand; *Calluna vulgaris*) und weisen auch nur geringe Unterschiede in den Wasserbilanzen auf.

Die Lysimeter in Gruppe 3 (Braunerde auf Sand, *Calluna vulgaris*) erfassen mehr Niederschlag, der auch im gleichen Maße zu mehr Evapotranspiration führt. Die Ablaufmenge ist gegenüber Gruppe 1 und 2 gleich.

Die Lysimeter in Gruppe 4 (Parabraunerde auf lehmigem Sand, *Calamagrostis epigejos*) „empfangen“ offensichtlich mehr Niederschlag, und verdunsten auffallend mehr als die Lysimeter aller anderen Gruppen, so dass es zu weniger Ablauf kommt.



**Abbildung 78:** Wasserbilanzen 2011, Lysimeter 1 bis 12, Lysimeterstation Colbitz.

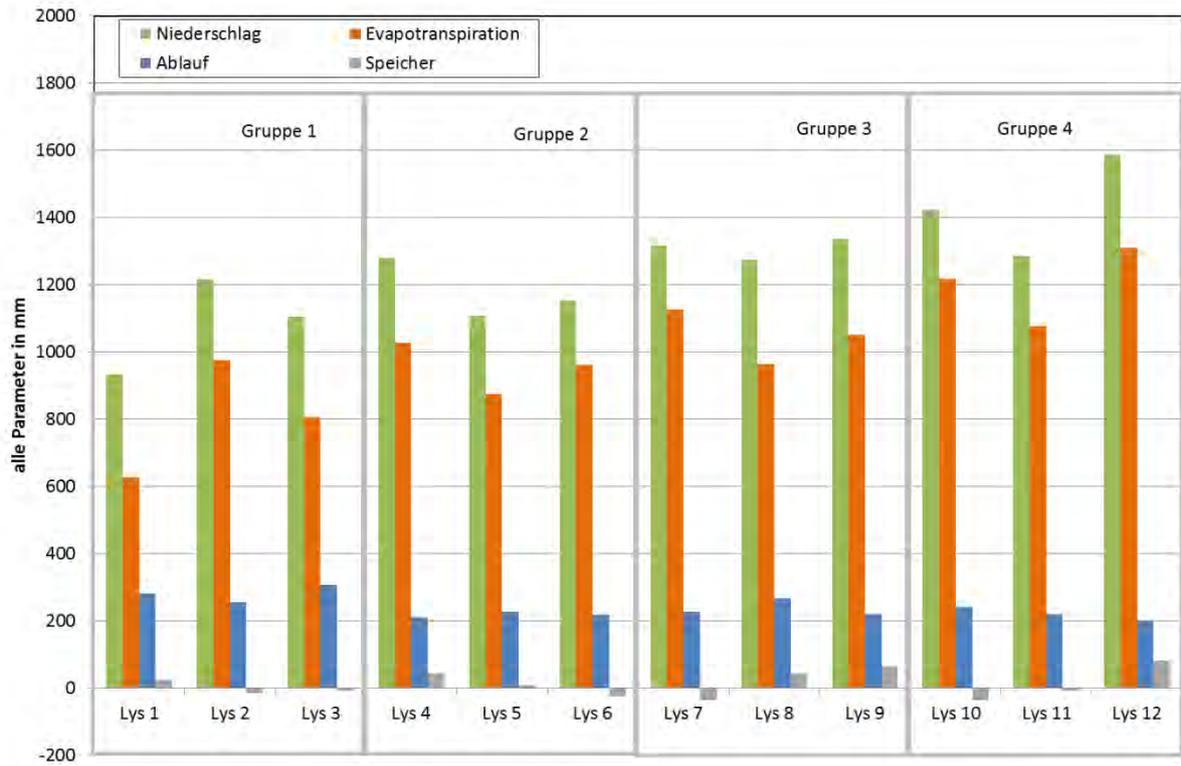


Abbildung 79: Wasserbilanzen 2012, Lysimeter 1 bis 12, Lysimeterstation Colbitz.

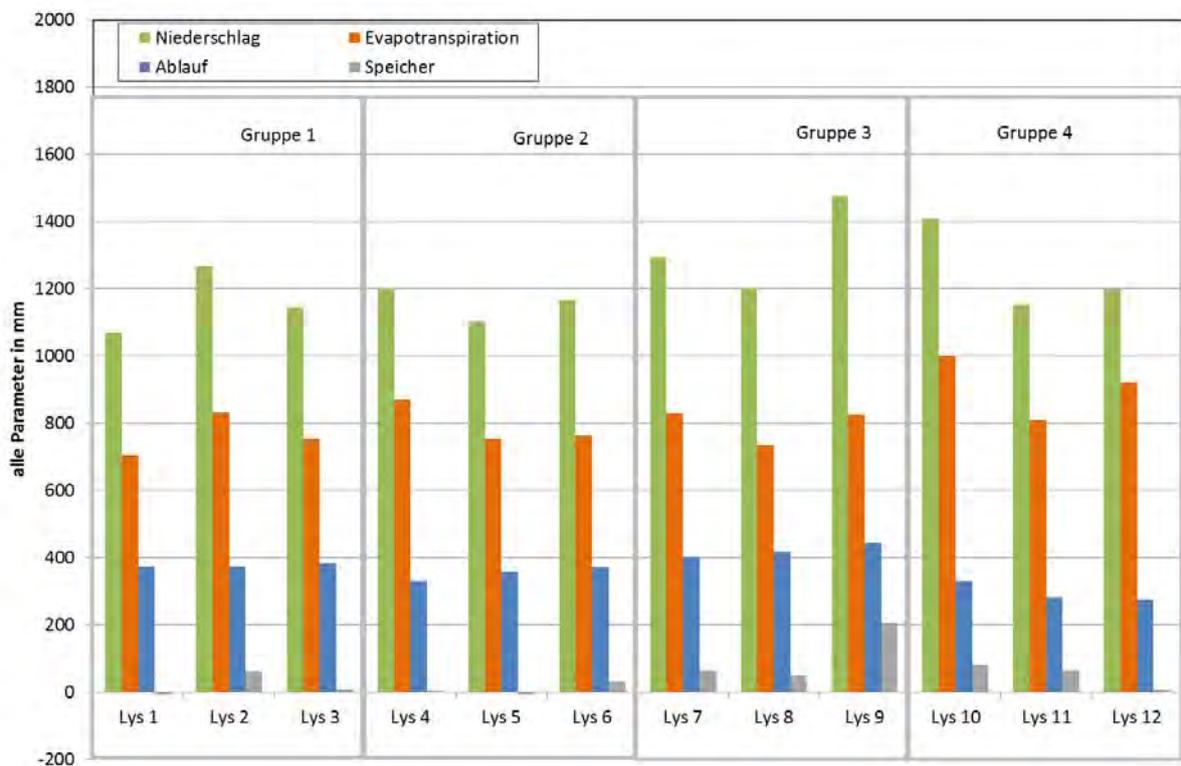
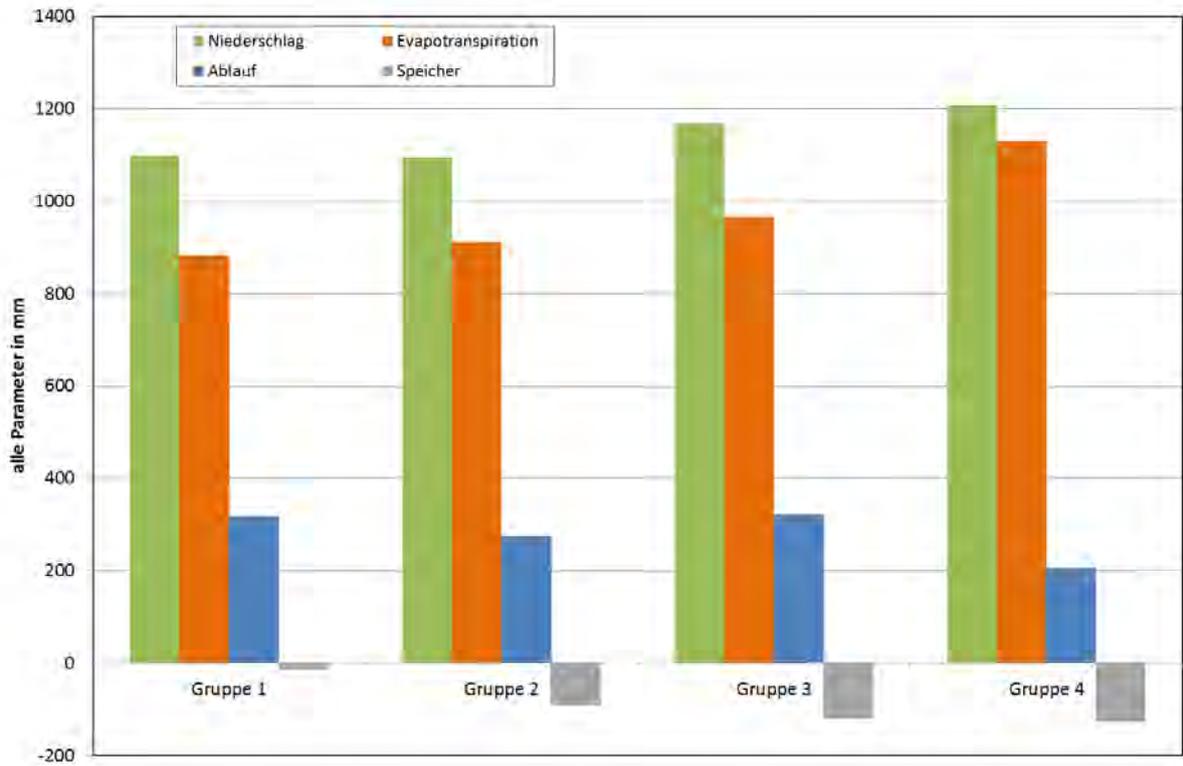
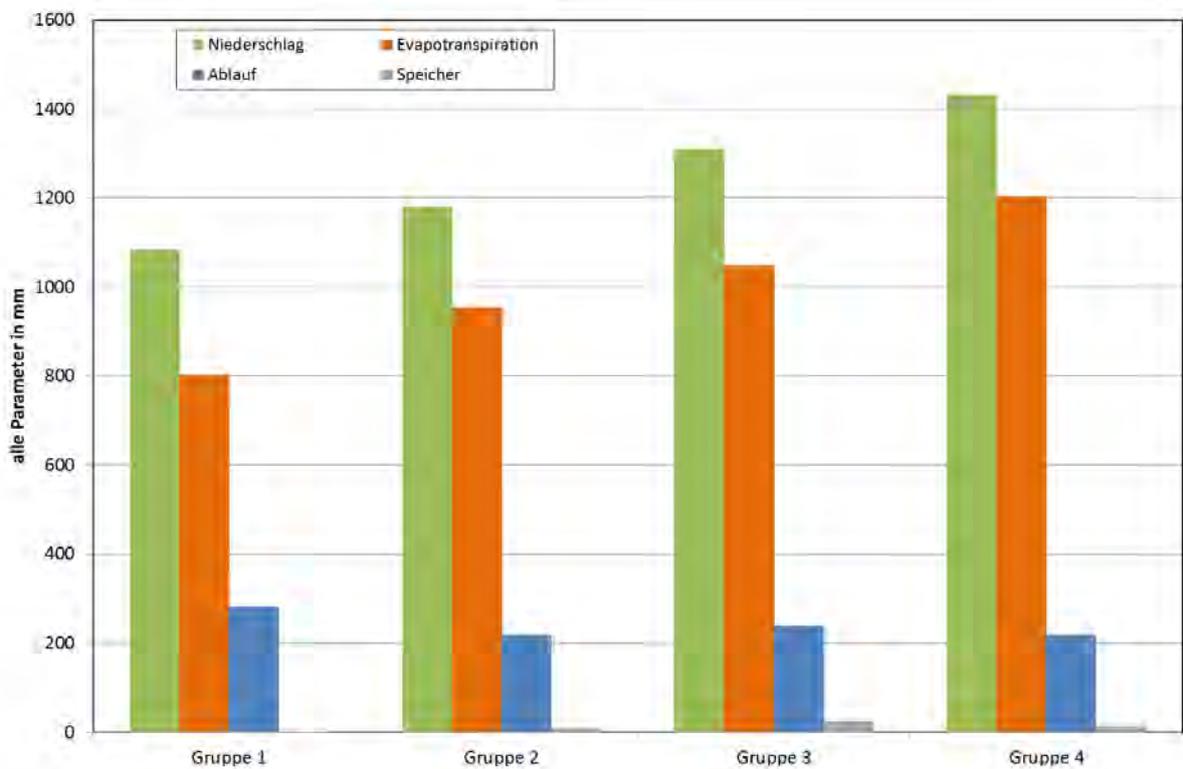


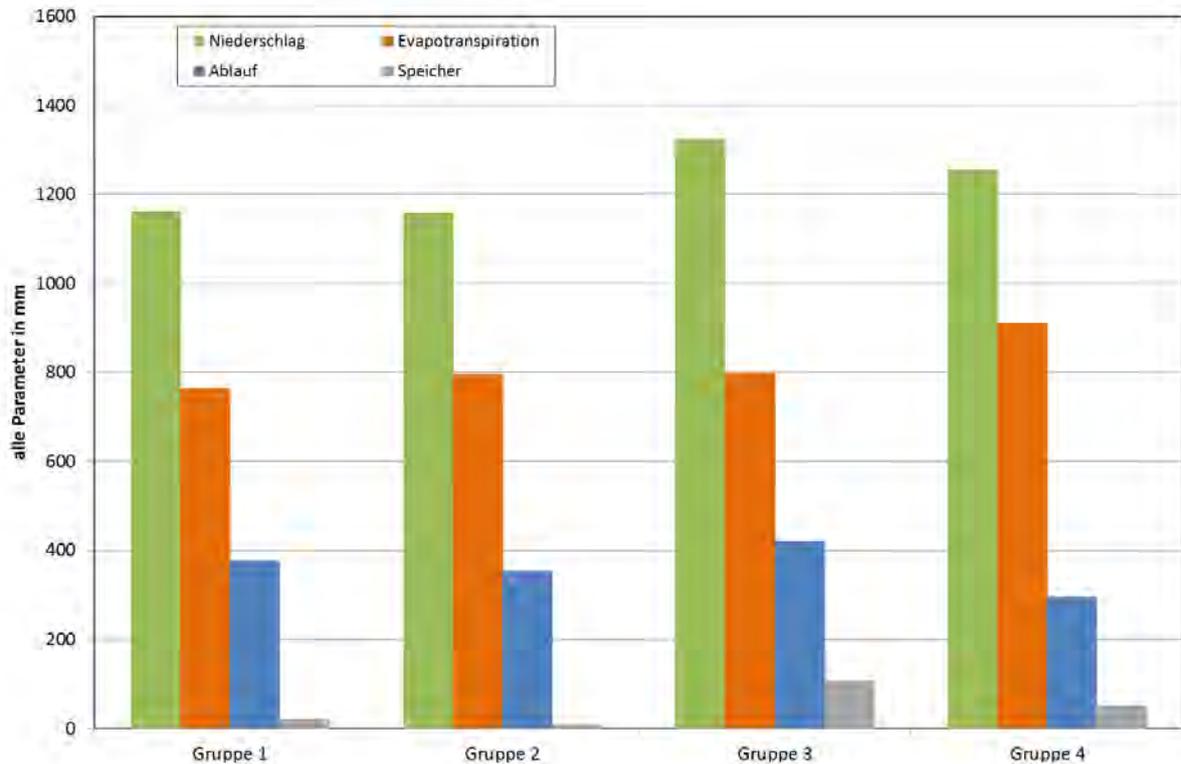
Abbildung 80: Wasserbilanzen 2013, Lysimeter 1 bis 12, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 81:** Wasserbilanzen 2011, Gruppe 1 bis Gruppe 4, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 82:** Wasserbilanzen 2012, Gruppe 1 bis Gruppe 4, Lysimeterstation Colbitz.

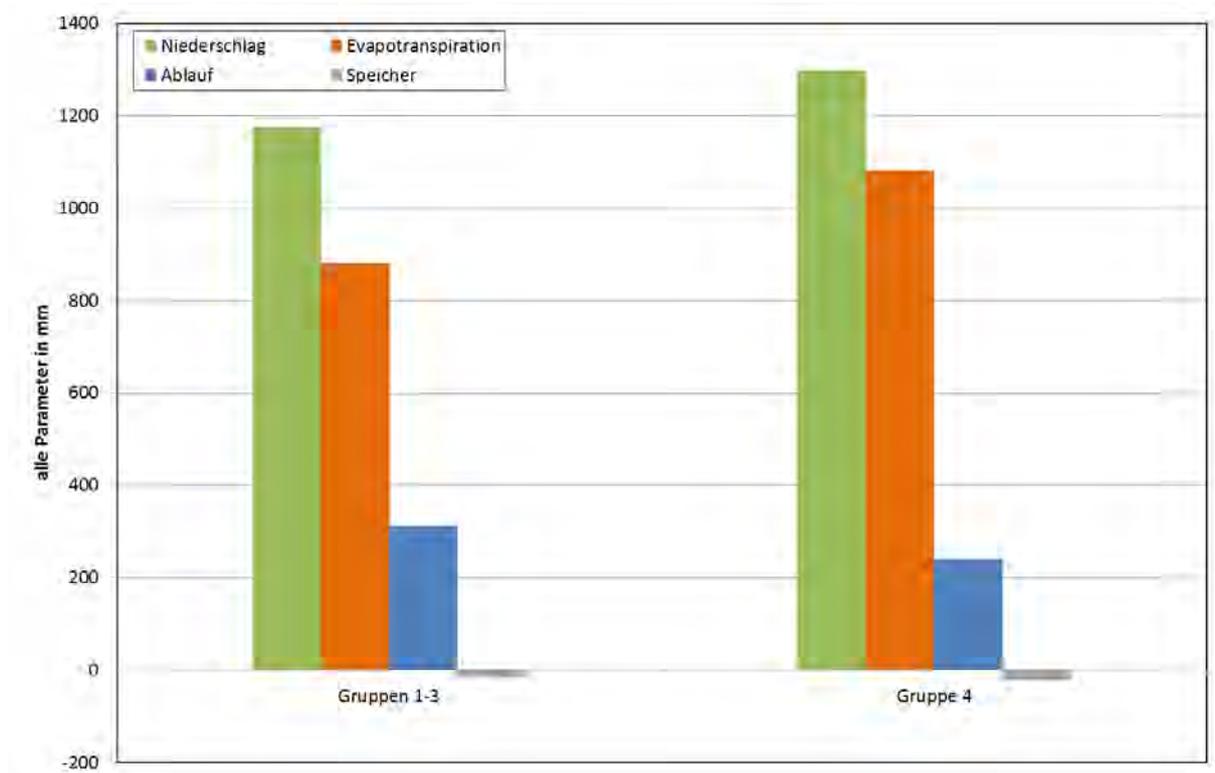


**Abbildung 83:** Wasserbilanzen 2013, Gruppe 1 bis Gruppe 4, Lysimeterstation Colbitz.

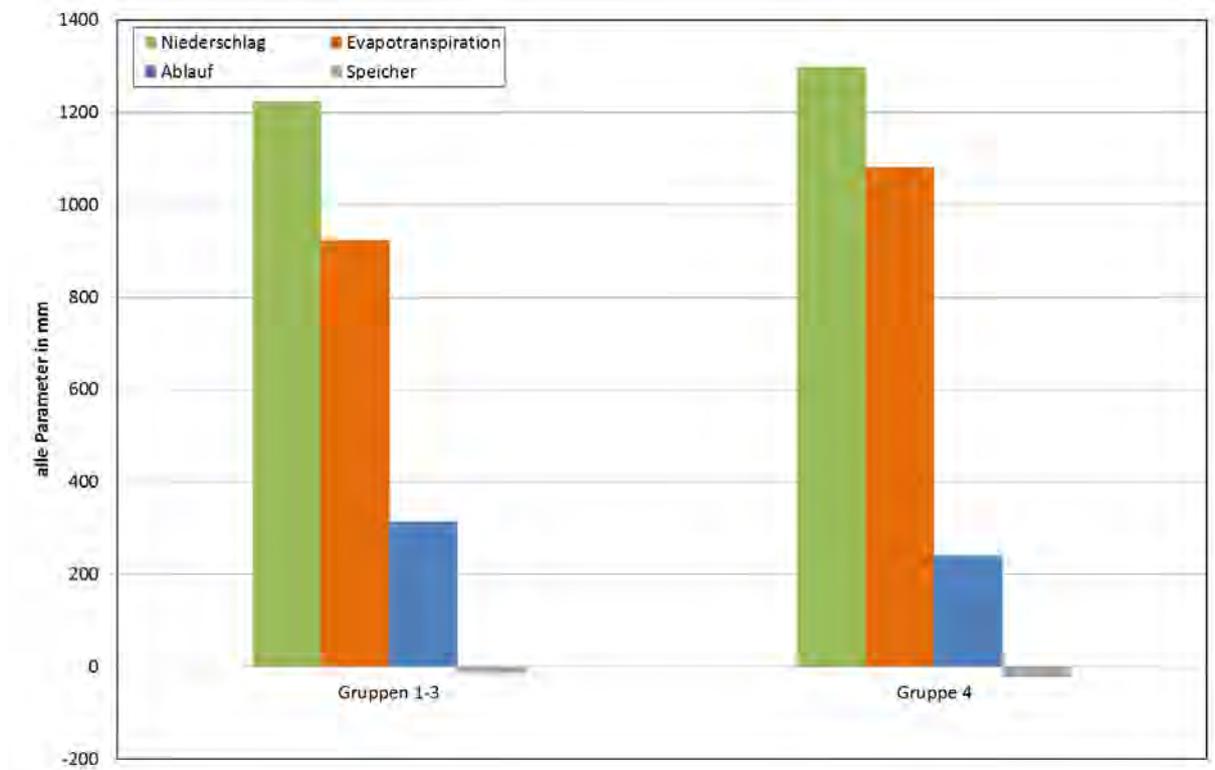
Da die Fragestellung auf den Unterschied zwischen den Bepflanzungen mit *Calluna vulgaris* und *Calamagrostis epigejos* abzielt, bietet sich ein Vergleich an, wie er in Abbildung 84 vorgenommen wird: Es werden die Parameter des Wasserhaushaltes für alle drei Jahre für die Lysimeter 1 bis 9, also Gruppe 1 bis 3, denen der Lysimeter 10 bis 12, also Gruppe 4, gegenübergestellt.

Für Abbildung 85 wurde ähnlich vorgegangen wie bei der Erstellung von Abbildung 84. Jedoch wurden die drei Lysimeter, deren Werte am wenigsten vertrauenswürdig waren (Lysimeter 1, 5 und 8; vgl. Kapitel 7 *Qualität der Messwerte*), in der Berechnung nicht mit verwendet.

Die Unterschiede sind bei beiden Darstellungen sichtbar und zeigen eine höhere Empfänglichkeit von Gruppe 4 für Niederschläge. Dies kann auf stärkeren Bewuchs von *Calamagrostis epigejos* gegenüber *Calluna vulgaris* und damit einer größeren Auffangfläche für Niederschläge mit großem Einfallwinkel ebenso zurückzuführen sein wie auf die vermehrte Möglichkeit, abgesetzte Niederschläge zu fassen. Es findet aber eine verstärkte Evaporation statt, so dass die Ablaufmenge gegenüber den Gruppen 1 bis 3 deutlich reduziert ist. Diese verstärkte Evapotranspiration kann durch Interzeption ebenso bedingt sein wie durch eventuell höheren Wasserverbrauch von *Calamagrostis epigejos* in der Wachstumsphase gegenüber der langsam wachsenden *Calluna vulgaris*.



**Abbildung 84:** Wasserbilanzen 2011, 2012 und 2013 zusammengefasst zu Durchschnittswerten, Gruppen 1 bis 3 und Gruppe 4, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung 85:** Wasserbilanzen 2011, 2012 und 2013 zusammengefasst, Gruppen 1 bis 3 und Gruppe 4, ohne Werte der Lysimeter 1, 5 und 8 (Grund: Messwertqualität), Lysimeterstation Colbitz.

Somit kann resümiert werden, dass bei einem Bewuchs mit *Calamagrostis epigejos* weniger Grundwasserneubildung stattfindet. Es bleibt aber Spielraum für andere Interpretationen:

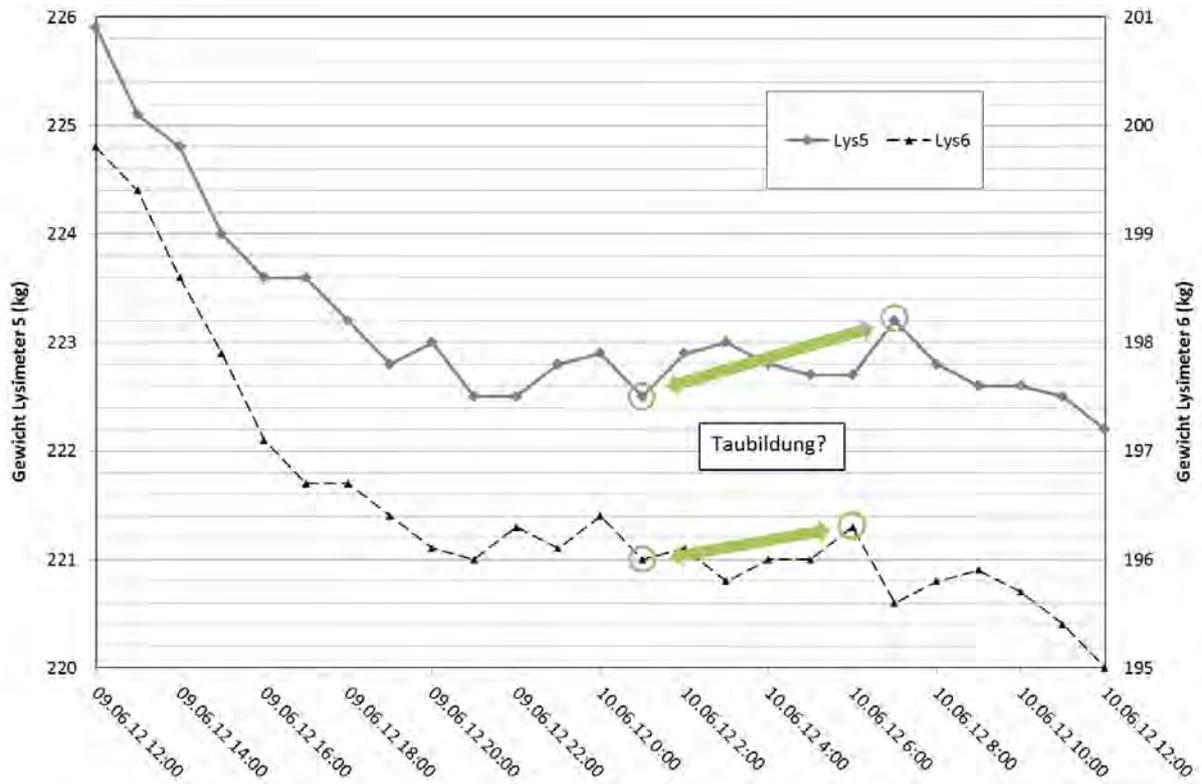
- Die Unterschiede können bodenartbedingt sein.
- Die Ungenauigkeiten der Lysimetermessungen begünstigen die unterschiedlichen Ergebnisse.
- Die Bepflanzung der Lysimeter ist nicht mehr so strikt differenziert, wie direkt nach der Neubepflanzung. So war bei der Standortbegehung am 19. September 2013 zu sehen, dass sich auch auf den mit *Calluna vulgaris* bepflanzten Lysimetern (1 bis 9) zusätzlich Gräser (dabei auch *Calamagrostis epigejos*) etabliert hatten.

#### 6.4 Nachweis von abgesetzten Niederschlägen

Mit Lysimetern, die über eine technisch mögliche Wägegenauigkeit von 0,1 kg und eine zeitliche Auflösung von weniger als einer Stunde verfügen, sollte die Entstehung von abgesetzten Niederschlägen, also Tau, Nebel und Reif nachzuweisen sein.

Dies ist ein großer Vorteil gegenüber Regenmessern nach Hellmann; abgesetzter Niederschlag wurde mit Hilfe von Lysimetern schon in den verschiedensten Regionen wie bspw. in Deutschland (XIAO 2009) oder China (HAGENAU et al. 2014) mit Mengen von bis zu 0,8 mm pro Tag und bis zu 60 mm pro Jahr ermittelt.

Die Lysimeter in Colbitz liefern trotz aufwendiger Analyse der Datenreihen keinerlei Niederschlagsereignisse, die eindeutig auf Taubildung o. ä. zurückzuführen sind. Mögliche Taubildung wird stets durch Oszillationen überlagert. Wie Abbildung 86 zeigt, kann nur spekuliert werden, ob die Erhöhung des Gewichts, die nachts über einen Zeitraum von mehreren Stunden vonstattengeht, auf abgesetzte Niederschläge zurückzuführen ist.



**Abbildung 86:** Zunahme der Gewichte von Lysimeter 5 und 6 in der Nacht vom 9. zum 10. Juni 2012, Lysimeterstation Colbitz.

## 7. Qualität der Daten

Die Daten der meteorologischen Station sowie die Wiege- und Ablaufdaten wurden dem Bearbeiter als fortlaufend geschriebenes CSV-Dokument übergeben. Außerdem sind die Daten für Zugriffsberechtigte auf der Internetplattform des Kooperationspartners UTK Zeitz einzusehen. Niederschlagsdaten der verschiedenen Stationen, Beschaffenheitsdaten des Sickerwassers und Depositionsdaten waren ebenfalls als CSV- oder XLS-Dateien übergeben worden.

Bei der Auswertung der Lysimeterdaten fallen einige Datenlücken ins Gewicht, da Datenverluste kaum kompensiert werden können. Datenlücken bei den Gewichten der einzelnen Lysimeter können zum Teil durch Abschlüsse oder Interpolation geschlossen werden. Bei den Ablaufmengen würden fehlerhafte Mengenermittlungen jedoch nicht nur zur Verfälschung der gesamten Wasserbilanz führen, sondern auch zu wenig belastbaren Aussagen zur Grundwasserneubildung, dem wichtigsten aller mit Lysimetern ermittelten Parameter.

Im Folgenden soll auf spezielle Fehler in den Daten eingegangen werden:

### *Datenlücken bei Wäge- und Ablaufdaten der Lysimeter*

Bei den bestehenden Datenlücken handelt es sich um längere, teils mehrtägige, Lücken, die jeweils alle Lysimeter betreffen (bspw. bedingt durch technische Probleme bei der Stromversorgung). Lücken werden sichtbar, indem über ihre Dauer stets ein konstanter Wert angezeigt wird. Das rechnerische Auffüllen der Datenlücken erfolgt durch Interpolation.

### *Unkorrekte Gewichtsangabe in den ersten Monaten nach der Inbetriebnahme der neuen Messtechnik und der neuen Datenlogger*

Dieser Fehler, der jede Wägedifferenz als 1,4 kg oder Vielfaches davon ausgibt, konnte nicht beseitigt werden. Er betrifft alle Lysimeter im Zeitraum von 1. Juli 2010 bis 31. Oktober 2011.

### *Einzelne Lysimeter*

Generell nicht zufriedenstellend sind die ausgegebenen Werte der Lysimeter 1, 5 und 8. Bei Lysimeter 1 sind, besonders im Jahr 2011, teils geringe Masseschwankungen erfasst worden, was letztlich zu einer Unterschätzung von Niederschlag und Evapotranspiration führt. Bei Lysimeter 5 erscheinen die angegebenen Ablaufdaten unsicher und bei Lysimeter 8 gab es in den ersten Monaten keine verlässlichen Werte.

### *Sprünge über ein oder mehrere Intervalle bei den Wägedaten*

Inmitten ansonsten plausibler Daten traten, oft bei einzelnen, selten bei mehreren oder allen Lysimetern, Sprünge zwischen mindestens zwei oder auch mehreren Messwerten auf. Meteorologische und Ablaufdaten waren nicht betroffen. Im relativ günstigen Fall sieht das so aus, dass einer deutlichen Gewichtszunahme eine Gewichtsabnahme annähernd gleichen Betrages folgt. (Oder einer Abnahme folgt eine Zunahme.)

In solch einem Fall ist der Fehler - auch aufgrund des hohen Betrages - deutlich erkennbar und lässt sich manuell korrigieren. Dies geschah hier für alle Sprünge mit einem Betrag von mehr als 3 kg. Kleinere fehlerbedingte Sprünge sind dagegen schwer

zu erkennen und zu korrigieren. So gibt es unzählige Sprünge um etwa 0,5 bis 1,5 Kilogramm. Obwohl klar ist, dass die Evapotranspiration in einem 10-Minuten-Intervall niemals größer sein kann als 0,3 mm (entspricht 0,3 kg, HILLEL 1998) ist es unmöglich, alle Gewichtsabnahmen, die darüber hinausgehen und die damit korrespondierenden Gewichtszunahmen, zu korrigieren.

Nicht korrigierte Sprünge führen insgesamt zu Überschätzungen der Parameter Niederschlag und Evapotranspiration. Die Korrektur auf null, wie sie hier stets vorgenommen wurde, birgt dagegen die Gefahr, dass reelle Niederschläge oder Evapotranspirationen in diesem Zeitintervall verloren gehen.

#### *Erhebliche Oszillationen bei der Wägung*

Im Gegensatz zum oben beschriebenen Fehler „Sprünge“ handelt es sich um ein geringfügiges Schwanken der Lysimetergewichte nach oben und unten. Es ist nicht auf Niederschläge oder Evapotranspiration zurückzuführen und tritt generell bei Lysimetern auf. (NOLZ et al. 2013) Es wird durch Wind begünstigt und tritt umso stärker auf, je unzuverlässiger die eingesetzte Wägetechnik ist. Auch Verläufe von bspw. 0,2; -0,3; 0,1; 0,2; -0,4 lassen sich eindeutig Oszillationen zuordnen, wenn sie in niederschlagsfreien Nächten auftreten, in denen keine nennenswerte Evapotranspiration stattfindet. Diese Oszillationen führen zu geringfügigen aber zahlenmäßig häufigen Überschätzungen der Parameter. Bei allen 12 Lysimetern in Colbitz traten sie gleichermaßen auf. Deshalb muss an dieser Stelle ganz klar die Frage aufgeworfen werden, ob die messtechnisch voreingestellte Genauigkeit von 0,1 kg überhaupt erfüllt werden kann. Aufgrund der enormen Oszillationen, die praktisch an jedem Tag und in jedem Lysimeter auftraten, wird die Bildung von Tau, Nebel und Reif, die bei der Auflösung von 0,1 kg, also 0,1 mm Niederschlag, normalerweise erkennbar ist, leider völlig überlagert.

#### *Datenlage insgesamt*

Zusammenfassend lässt sich der Datenlage eine ausreichend gute Qualität bescheinigen. Die Daten sind hinreichend genau für Trends oder allgemeine Aussagen. Die Daten sind noch nicht genau genug für die differenzierte Betrachtung von unterschiedlichen Bepflanzungen. Was jedoch auch an der Anzahl der betrachteten Jahre liegt, da drei Jahre noch keine langfristigen Aussagen zulassen.

Wie bereits erwähnt, führen die verschiedenen Messfehler größtenteils zum Überschätzen der Parameter, zum Teil aber auch zum Unterschätzen. Die angesprochene Überschätzung durch nicht erkannte Sprünge sowie sonstige Schwankungen und Oszillationen wird hier als hauptsächlicher Störeinfluss angenommen. So wird davon ausgegangen, dass für die Parameter Niederschlag oder Evapotranspiration in den Bilanzen insgesamt wesentlich höhere Beträge als in der Realität berechnet wurden. Dies gilt aber für beide Parameter in gleichem Maße, so dass das Ergebnis in sich stimmig ist.

Eine Kompensation fehlender oder fehlerhafter Daten mit Daten der täglich vorgenommenen Handwägung wäre mit einem aufwendigen rechnerischen Verfahren möglich.

## 8. Fazit und Ausblick

Die Depositionsdaten ergänzen sich sehr gut mit denen einer Station im etwa 100 km entfernten Halle (Saale). Bei einigen der untersuchten Kationen und Anionen lassen sich geringfügige Trends erkennen. Bei Sulfat ging die jährliche deponierte Menge in den letzten 16 Jahren kontinuierlich zurück. Hier zeigt sich auch ein deutlicher Zusammenhang zur Sickerwasserbeschaffenheit.

Ansonsten konnten kaum Korrelationen zwischen den deponierten Stoffmengen und deren Gehalten im Sickerwasser gefunden werden. Außerdem erlaubte die Datenlage keine Ermittlung von korrekten Mischungskonzentrationen.

Die neu installierten Systeme zur Messung von Niederschlag und meteorologischen Daten arbeiten grundsätzlich einwandfrei, sind aber anfällig bspw. beim Auftreten von enormen Schneemengen und -verwehungen.

Das Niederschlagsgeschehen an der Station Colbitz läuft analog zu dem Geschehen an den benachbarten Stationen, insgesamt fallen in Colbitz jedoch mehr Niederschläge als in Zielitz, Letzlingen, Dolle, Born und Angern. Es sind innerhalb der Station Colbitz Tendenzen zu mehr Tagen mit starkem Niederschlag und zu weniger Sommer-niederschlag zu erkennen.

Mit den Lysimetern lassen sich Ergebnisse ableiten, die hinreichend genau sind, um den Wasserhaushalt zu charakterisieren. Es zeigt sich so, dass der Anfall von Sickerwasser durch die Anpflanzung von *Calamagrostis epigejos* geringer wird.

Zur weiteren Verbesserung der Datenerfassung sowie zur Gewinnung weiterer Erkenntnisse zum System Atmosphäre-Boden-Sickerwasser in quantitativer und qualitativer Hinsicht werden folgende künftige Arbeiten vorgeschlagen:

- Vollumfänglicher Abgleich der Depositionsdaten seit 1998 mit vergleichbaren Standorten in Sachsen-Anhalt zur Charakterisierung von Spezifika am Standort Colbitz.
- Quantitative Untersuchung der Rolle von Streuauflage beim Eintrag insbesondere von Stickstoffparametern und Phosphor.
- Genauere Betrachtung der Zusammenhänge von pH-Wert, Mangan- und Aluminiumkonzentration.
- Untersuchung der Abhängigkeit der Konzentrationen im Sickerwasser von der Niederschlagsmenge und -intensität im Beprobungszeitraum.
- Stetige Erfassung der Ablaufmenge vor der Parameteranalyse. Dies ist unabdingbar für die Ermittlung korrekter Mischungskonzentrationen.
- Kontinuierliche Beobachtung der meteorologischen Station im Hinblick auf Einflüsse durch Schneefall, Schneeverwehungen sowie die Situation bei verharschter Schneebedeckung.
- Einbeziehung aller verfügbaren Niederschlagsstationen in der Region zur Ermittlung von Tendenzen wie bspw. dem Auftreten von Starkregen oder der jährlichen Niederschlagsverteilung.
- Betrachtung gemessener meteorologischer Parameter, wie bspw. Windrichtung und Windgeschwindigkeit, in jahreszeitlichen Zusammenhängen.

- Nutzung der gemessenen meteorologischen Parameter zur Korrektur unzuverlässiger Lysimeterdaten.
- Errechnung von bewuchsabhängigen Koeffizienten zur Darstellung des Zusammenhanges von potentieller und tatsächlicher Evapotranspiration.

## 9. Literaturverzeichnis

- BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014): Hydrogeologische Begutachtung der Colbitz-Letzlinger Heide - Kontrollmonitoring auf dem Truppenübungsplatz Altmark.  
[http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/laufend/Beratung/Altmark/altmark\\_projektbeschr.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/laufend/Beratung/Altmark/altmark_projektbeschr.html) (15.10.2014)
- BMJ Bundesministerium der Justiz (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (TrinkwV). BGBl. I, S. 959, Bonn.
- BMJ Bundesministerium der Justiz (2011): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (TrinkwV). Novellierung vom 28. November 2011. BGBl. I, S. 2370, Bonn.
- Bundeswehr Streitkräftebasis [Hrsg.] (2011): Truppenübungsplatz Altmark. Datenblatt TrÜbPI Altmark.  
<http://www.streitkraeftebasis.de/> (27.10.2014)
- DECH, S. W., R. J. GLASER [Hrsg.] (1993): Fernerkundung von Umweltbelastungen auf dem militärische Übungsgelände in der Colbitz-Letzlinger Heide. Forschungsbericht. DLR-FB 93-46.
- DWD Deutscher Wetterdienst (2014): Wetterlexikon, Definition Starkniederschlag.  
<http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=S&DAT=Starkregen>, (13.07.2014)
- FISCHER (2013): Niederschlagsmessung für die Landwirtschaft - Vergleich von Messwerten verschiedener Regenmesser (Hellmann, Kippwaage, Ombrometer und Lysimeter). Masterarbeit. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften.
- FUGRO-HGN (2009): Entwicklung des Wasserhaushalts und der regionalen klimatischen Verhältnisse in der Colbitz-Letzlinger Heide anhand eines langjährigen, kontinuierlichen Monitorings an den Lysimeterstationen Colbitz. Angefertigt für LHW Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt. Unveröffentlicht.
- GÖTSCH, NADERMANN, H. EIGENBRODT (1933): Die Umstellung der Wasserversorgung der Stadt Magdeburg und die Errichtung des Grundwasserwerks in der Letzlinger Heide. Das Gas- und Wasserfach 18, 19 und 21.
- HAGENAU, J., H. BORG (2008): Eine mathematische Beschreibung der Stoffauswaschung aus porösen Medien in Abhängigkeit von der applizierten Wassermenge und der Applikationsrate. Altlastenspektrum 17 (2), 67-74.
- HAGENAU, J., H. BORG (2015): Differences in water household parameters caused by exposition in two equal lysimeters. Journal of Hydrology 520 (2015), 69-74.
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitt. Dt. Wetterd. 2 (11), Bad Kissingen (Dt. Wetterd.).
- HILLET, D. (1998): Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego.
- KIEFFER (2014): Datenerhebung für die Landwirtschaft - Einfluss des Sammelintervalls auf die Ergebnisse, dargestellt am Beispiel von Lysimetergewichten. Masterarbeit. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften.

- KORTÜM, F., A. HELBIG (1980): Zur Auswertung von Lysimeterbeobachtungen. Zeitschrift für Meteorologie. 107-111.
- MEISSNER, R., J. SEEGER, H. RUPP (2008): Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation lysimeter. JOURNAL OF PLANT NUTRITION AND SOIL SCIENCE-ZEITSCHRIFT FÜR PFLANZENERNAHRUNG UND BODENKUNDE. Volume 170, Issue: 3, Pages 335-344.
- MONTEITH, J. L. (1965): Evaporation and environment. Symposia of the Society for Experimental Biology 19, 205-224.
- MYERS, R. J. K., C. A. CAMPBELL, K. L. WEIER (1982): Quantitative relationship between net nitrogen mineralization and moisture content of soils. Can. J. Soil Sci. 62, 111-124.
- NOLZ, R., G. KAMMERER, P. CEPUDER (2013): Interpretation of lysimeter weighing data affected by wind. JOURNAL OF PLANT NUTRITION AND SOIL SCIENCE-ZEITSCHRIFT FÜR PFLANZENERNÄHRUNG UND BODENKUNDE, Volume 176, Issue 2 Pages 200-208.
- PIK Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2013): Die Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt. Kurzfassung der Studie von 2009. Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 2013 - Heft 2.
- Professor Hellriegel Institut e.V. (2009): Einrichtung und Erfassung von vegetationskundlichen Dauerbeobachtungsflächen in der Colbitz-Letzlinger Heide. Zwischenbericht 2009 für die Stiftung Umwelt, Natur- und Klimaschutz des Landes Sachsen-Anhalt.  
[http://www.kolleg.loel.hs-anhalt.de/cmsloel/fileadmin/Dateien/BFelinks/Projekte\\_Landschaftspflege/zwischenbericht\\_ch\\_2009.pdf](http://www.kolleg.loel.hs-anhalt.de/cmsloel/fileadmin/Dateien/BFelinks/Projekte_Landschaftspflege/zwischenbericht_ch_2009.pdf) (16.10.2014)
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194 (1995).
- SCHLEYER, R., H. KERNDORFF (1992): Die Grundwasserqualität westdeutscher Trinkwasserressourcen. WILEY-VCH Verlag. Weinheim [u. a.].
- SIEBNER, C. (1995): Lysimeterversuche zum Einfluß verschiedener Vegetationsformen auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt von Sandböden der Colbitz-Letzlinger Heide. Diplomarbeit. Fachbereich Agrarwissenschaften der Universität Göttingen.
- TLL Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2005): Wasserhaushaltsgrößen von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen - Ergebnisse der TLL-Lysimeterstation. Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Heft 1.
- TWM Trinkwasserversorgung Magdeburg GmbH [Hrsg.] (2012): 80 Jahre Trinkwasserversorgung aus der Colbitz-Letzlinger Heide.
- UFZ Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (1995): Erfassung des Wasserhaushalts bewaldeter Areale und Heidevegetation. Jahresbericht über Lysimetermessungen in der Colbitz-Letzlinger Heide. Unveröffentlicht.
- UFZ Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (1996): Erfassung des Wasserhaushalts bewaldeter Areale und Heidevegetation. Jahresbericht über Lysimetermessungen in der Colbitz-Letzlinger Heide. Unveröffentlicht.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure [Hrsg.] (2010): Richtlinie VDI 4320 Blatt 1, Messung atmosphärischer Depositionen. Gas und Wasserfach, Wasser Abwasser, 151, 2, 169.

- VDI Verein Deutscher Ingenieure [Hrsg.] (2014): Richtlinie VDI 4320 Blatt 3, Messung atmosphärischer Depositionen - Bestimmung der Deposition von wasserlöslichen Anionen und Kationen - Probenahme mit Bulk- und Wet-Only-Sammlern. In Bearbeitung.
- WEBER, S. (1974): Jahresbericht 1973. Großlysimeterstation Letzlinger Heide. Wasserwirtschaftsdirektion Magdeburg. Abteilung 1 Forschung. Unveröffentlicht.
- WECHSUNG, F., S. KADEN, H. BEHRENDT und B. KLÖCKING (2008): "Integrated Analysis of the Impacts of Global Change on Environment and Society in the Elbe River Basin." Weißensee Verlag, Berlin.
- WERNECKE, R., HELLMANN, G. (1982): 50 Jahre Wasserwerk Colbitz – Entwicklung der Trinkwasserversorgung für die Bezirksstadt Magdeburg. WWT Wasserwirtschaft, Wassertechnik Bd. 32.1982, 10, S. 346-348.
- WESTHUS, W. (2014): LEADER 2007 - 2013 der lokalen Aktionsgruppe Colbitz-Letzlinger Heide.  
<http://www.lag-clh.de/pages/leader-2007-2013/konzept.php>, (16.09.2013)

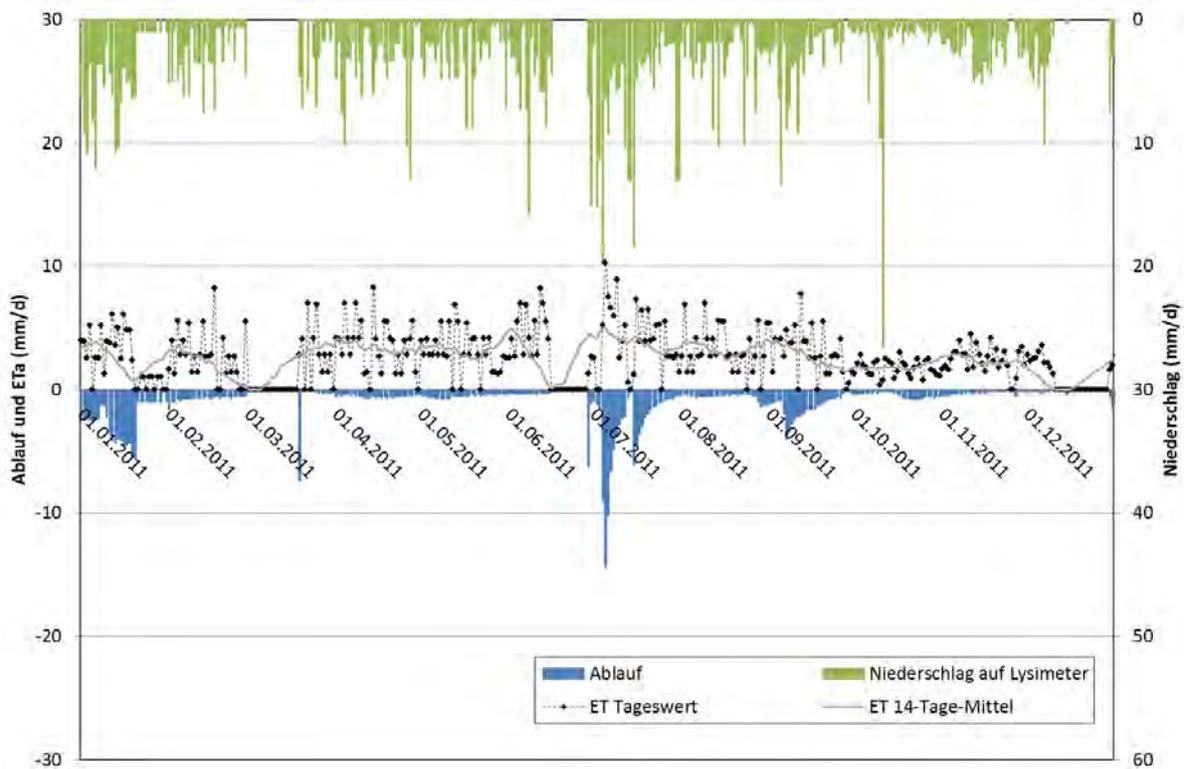
## **Anlagen**

In der Anlage befinden sich zunächst die Tagesverläufe aller Wasserhaushaltsparameter für die Jahre 2011, 2012 und 2013 für die Lysimeter 4 bis 12 (Abbildungen ah1 bis ah27).

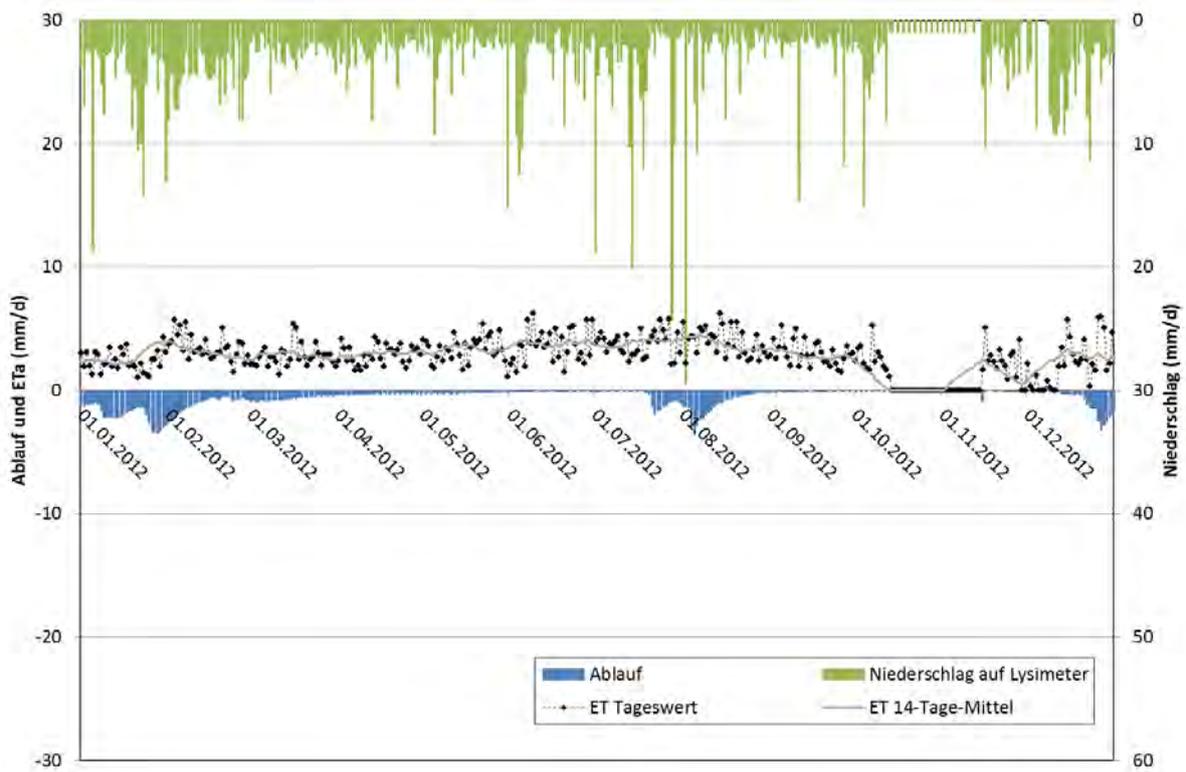
Dann folgen mit den Abbildungen ah28 bis ah38 die Vergleiche der mit den Lysimetern ermittelten Niederschläge der Lysimeter 2 bis 11 mit dem nach Hellmann ermittelten und nach Richter korrigierten Niederschlag.

Anschließend sind die monatlichen Wasserbilanzen der Lysimeter 4 bis 12 in Tabellenform dargestellt. Auf eine weitere Nummerierung der Tabellen nach dem bisherigen Schema wird dabei verzichtet.

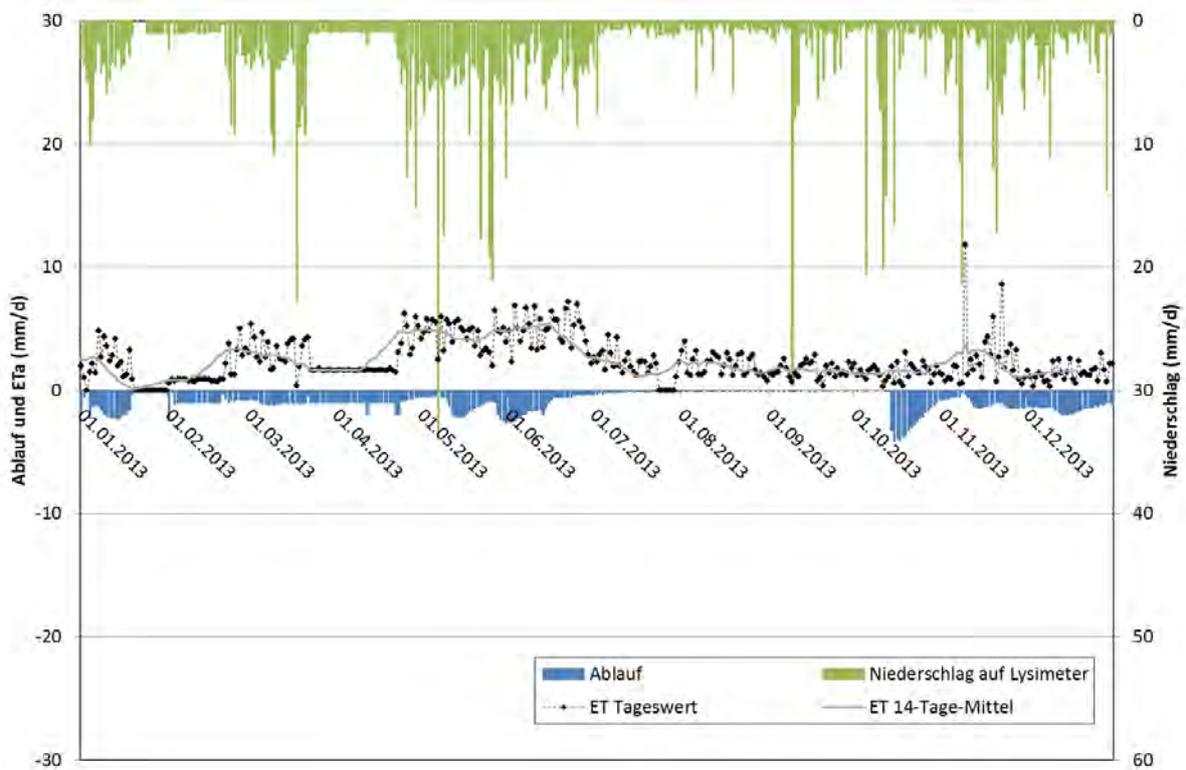
**Anlage 1: Tagesverläufe aller Wasserhaushaltsparameter für die Jahre 2011, 2012 und 2013 für die Lysimeter 4 bis 12 (Abbildung ah1 bis ah27).**



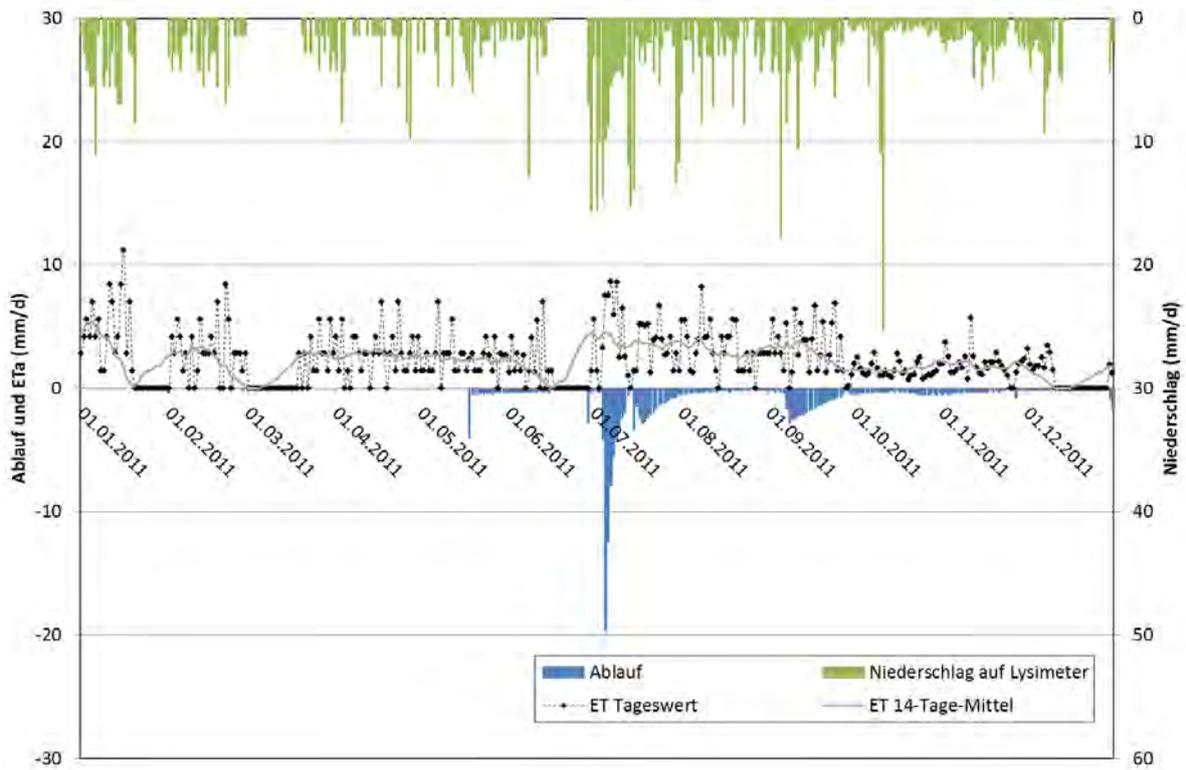
**Abbildung ah1:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 4, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



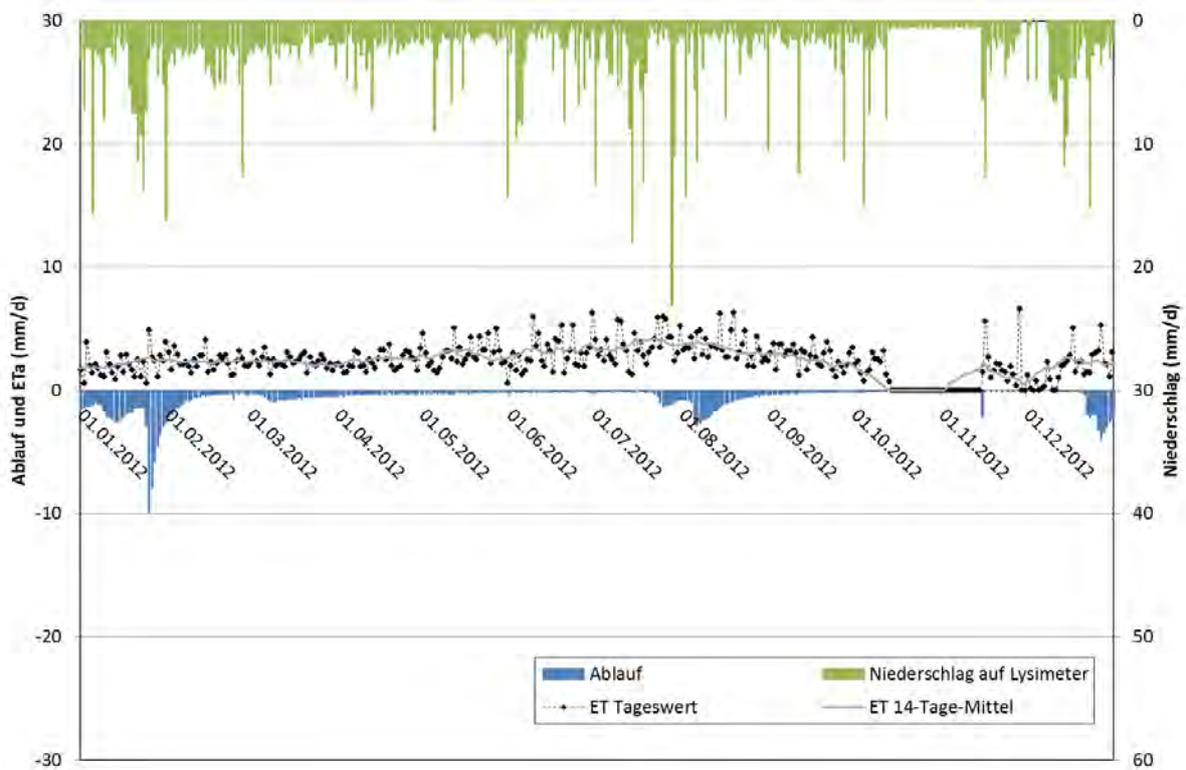
**Abbildung ah2** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 4, 2012 Lysimeterstation Colbitz.



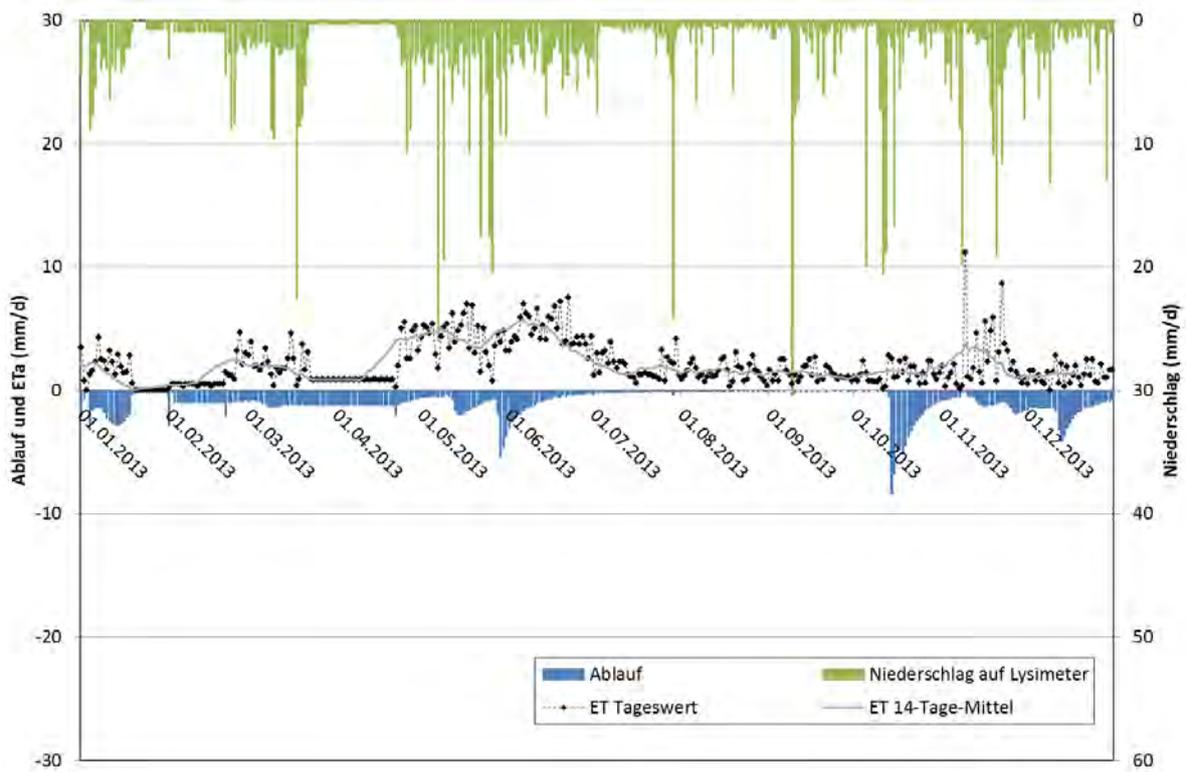
**Abbildung ah3** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 4, 2013 Lysimeterstation Colbitz.



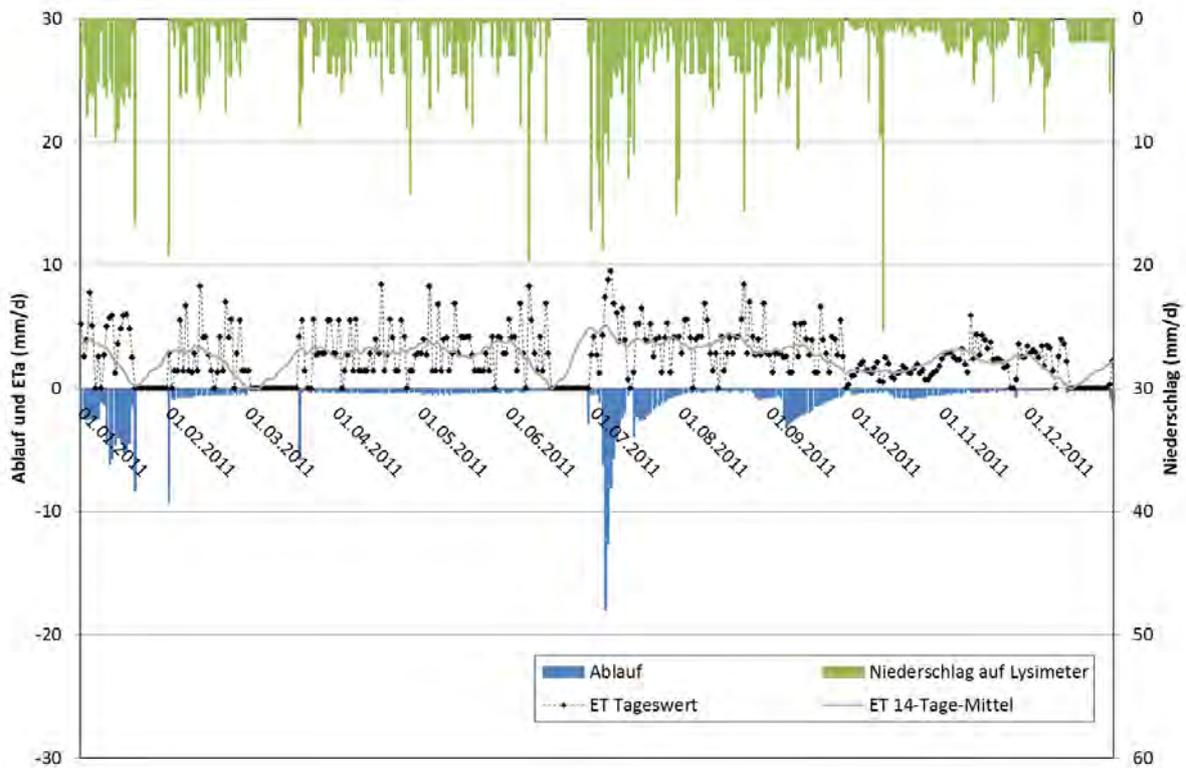
**Abbildung ah4** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 5, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



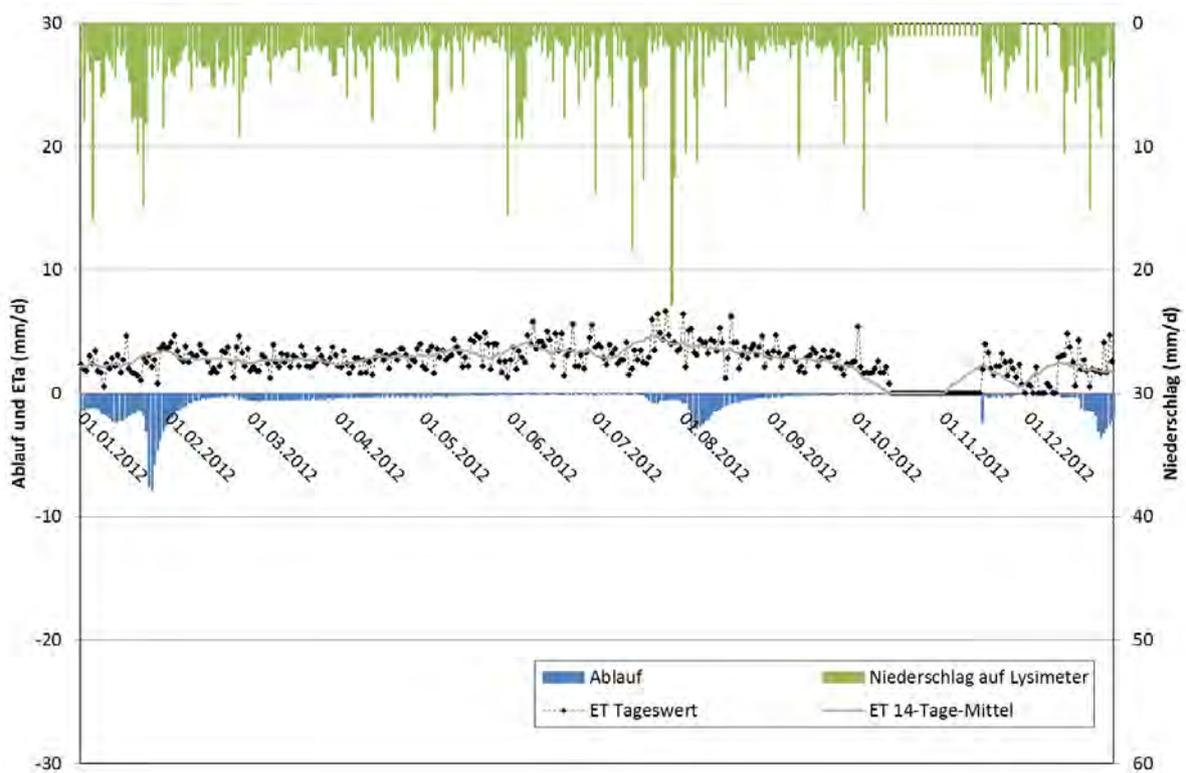
**Abbildung ah5:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 5, 2012, Lysimeterstation Colbitz.



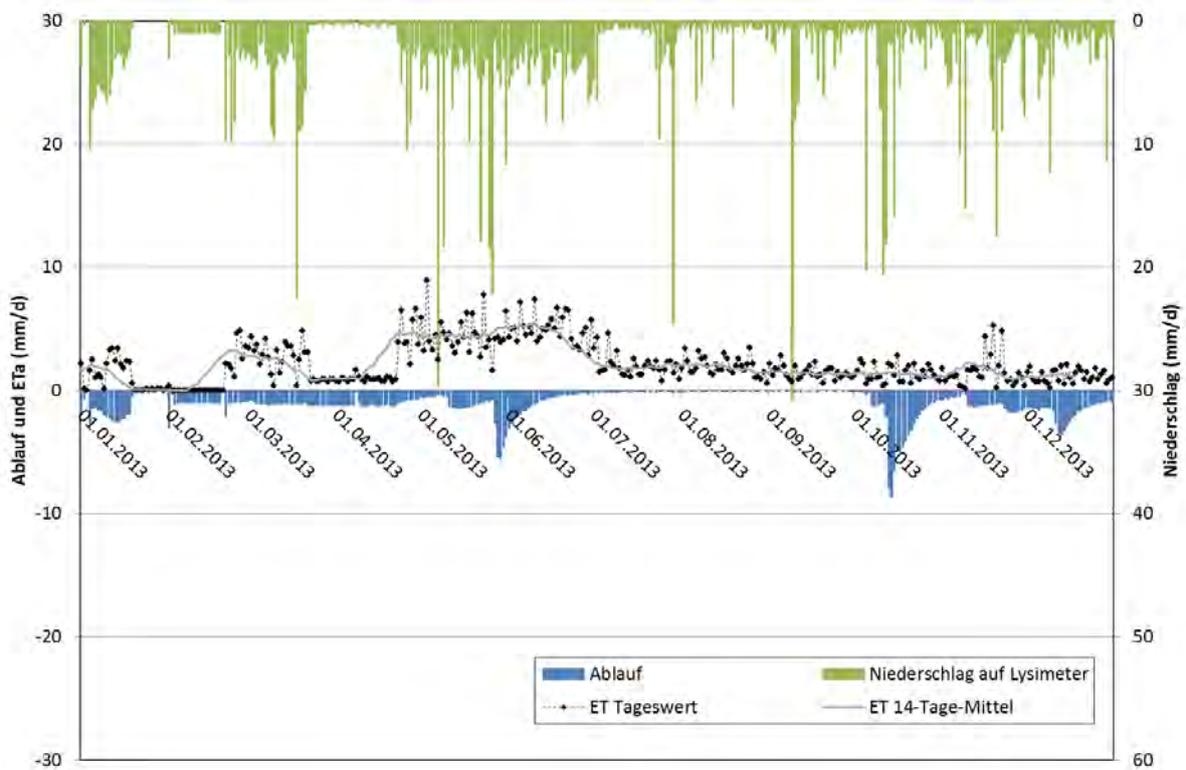
**Abbildung ah6:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 5, 2013, Lysimeterstation Colbitz.



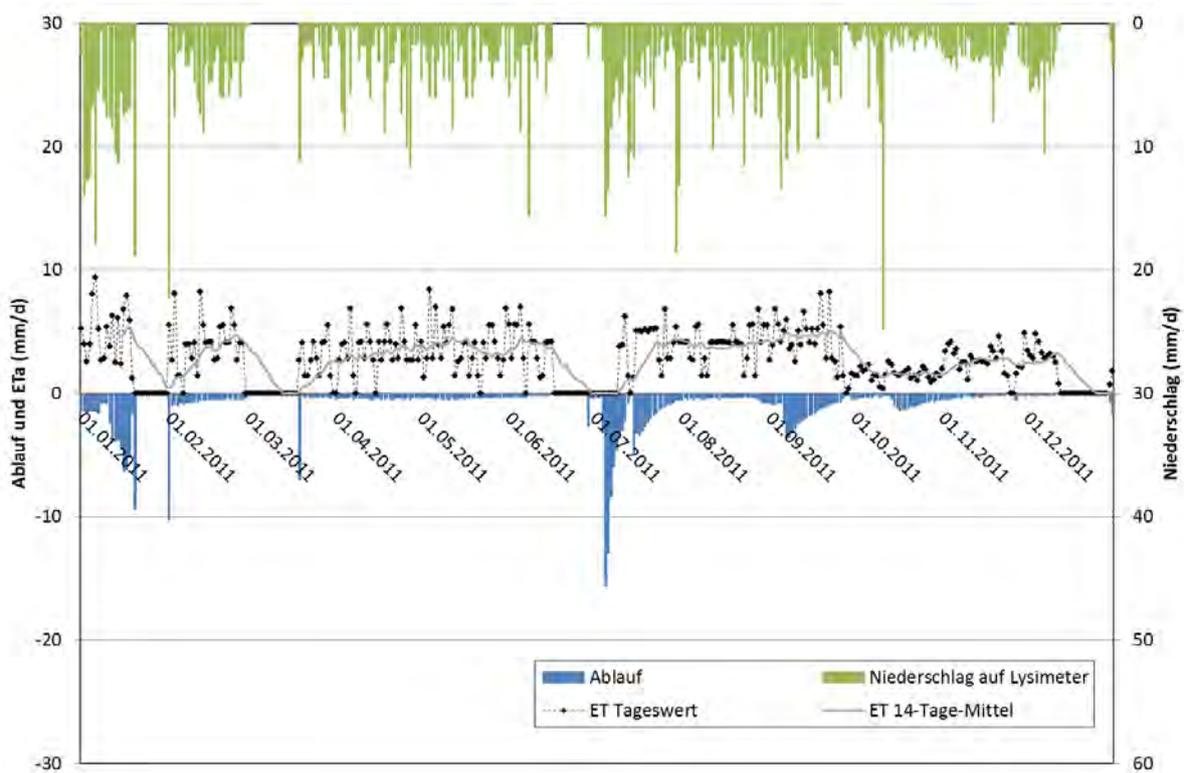
**Abbildung ah7:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 6, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



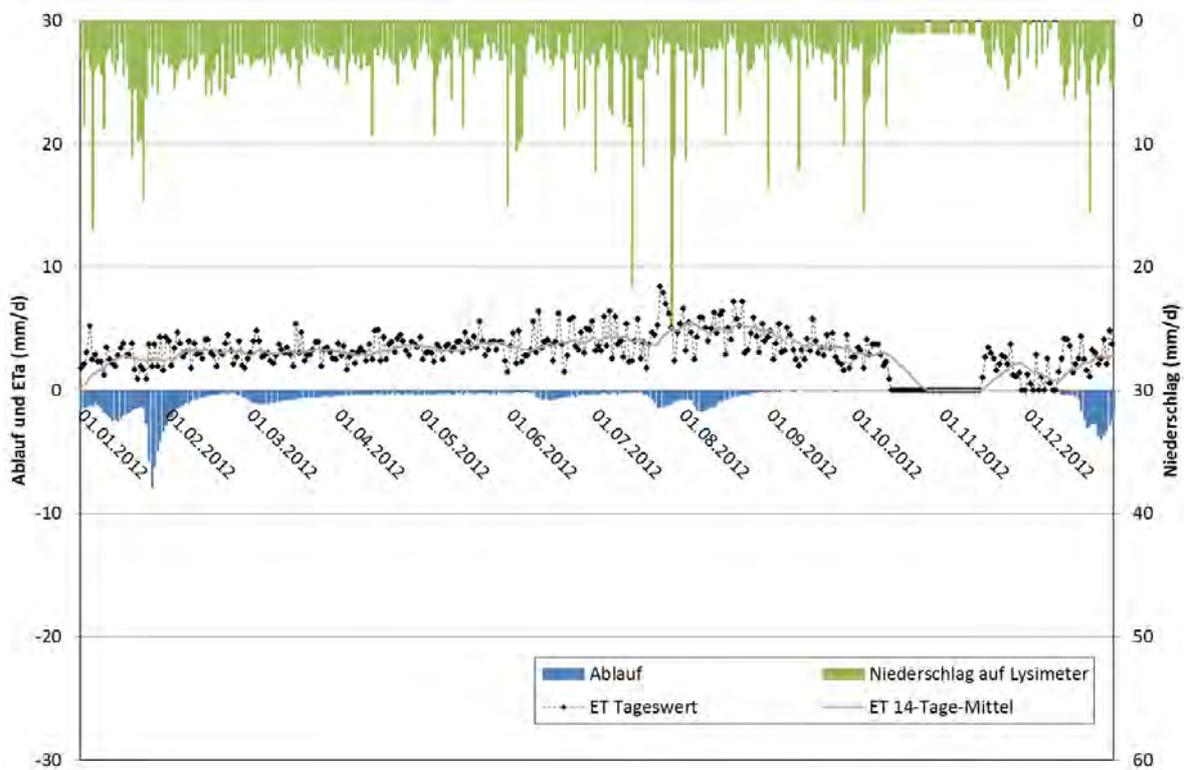
**Abbildung ah8:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 6, 2012, Lysimeterstation Colbitz.



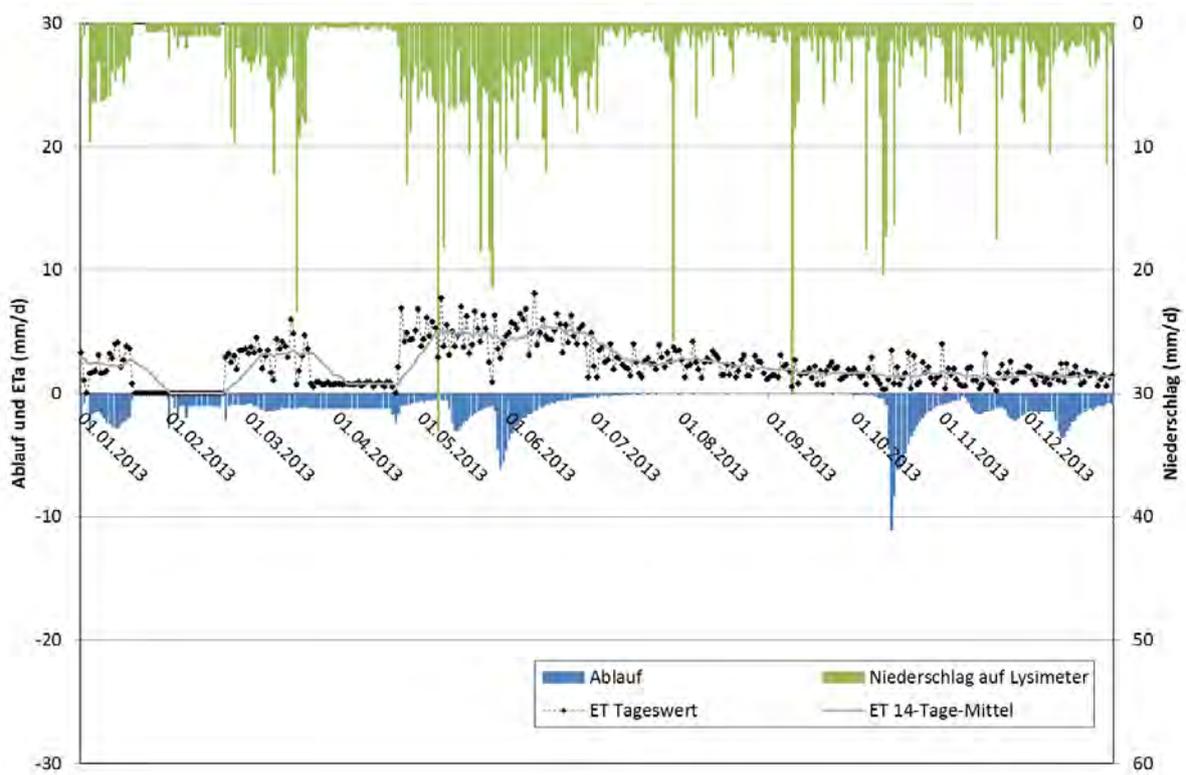
**Abbildung ah9:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 6, 2013, Lysimeterstation Colbitz.



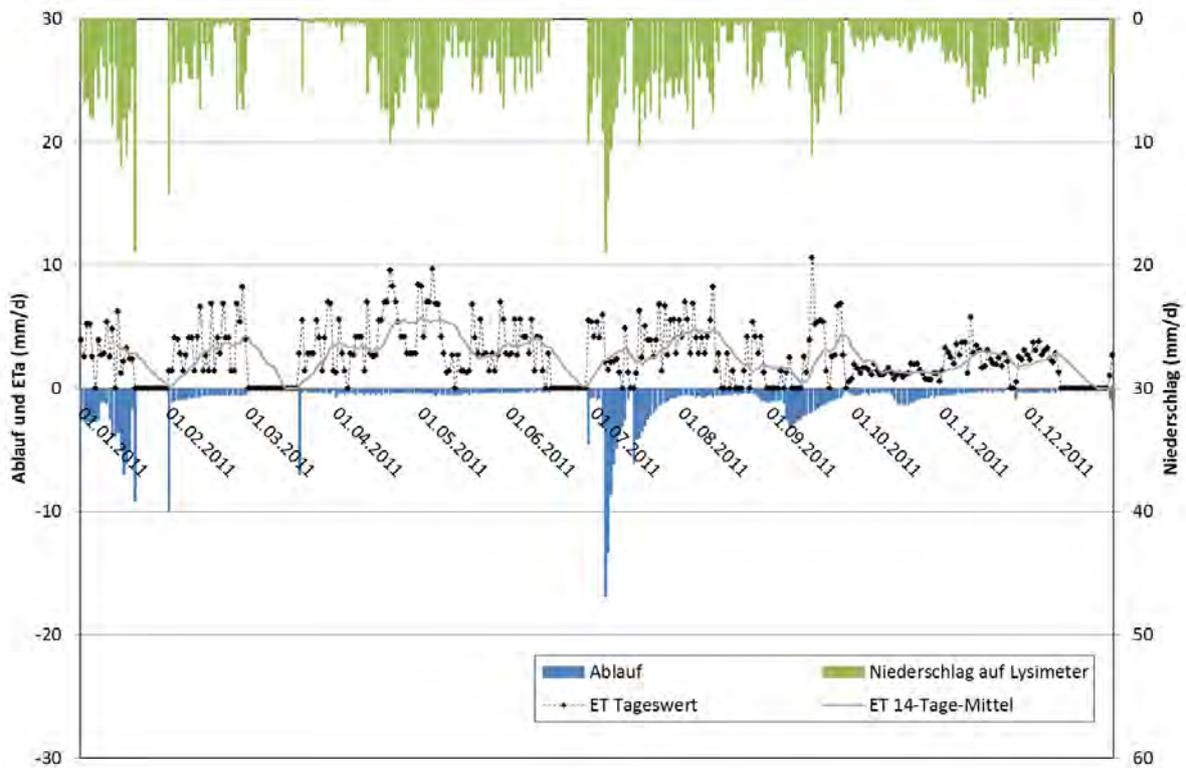
**Abbildung ah10:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 7, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



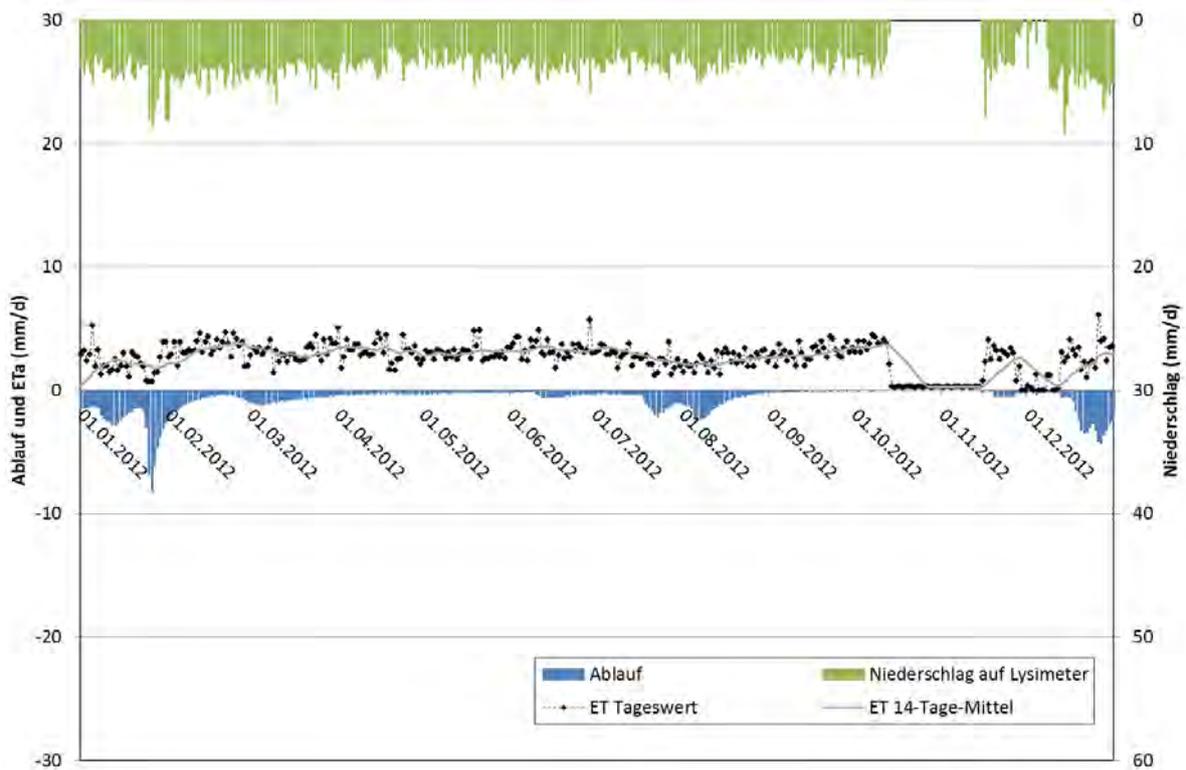
**Abbildung ah11:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 7, 2012, Lysimeterstation Colbitz.



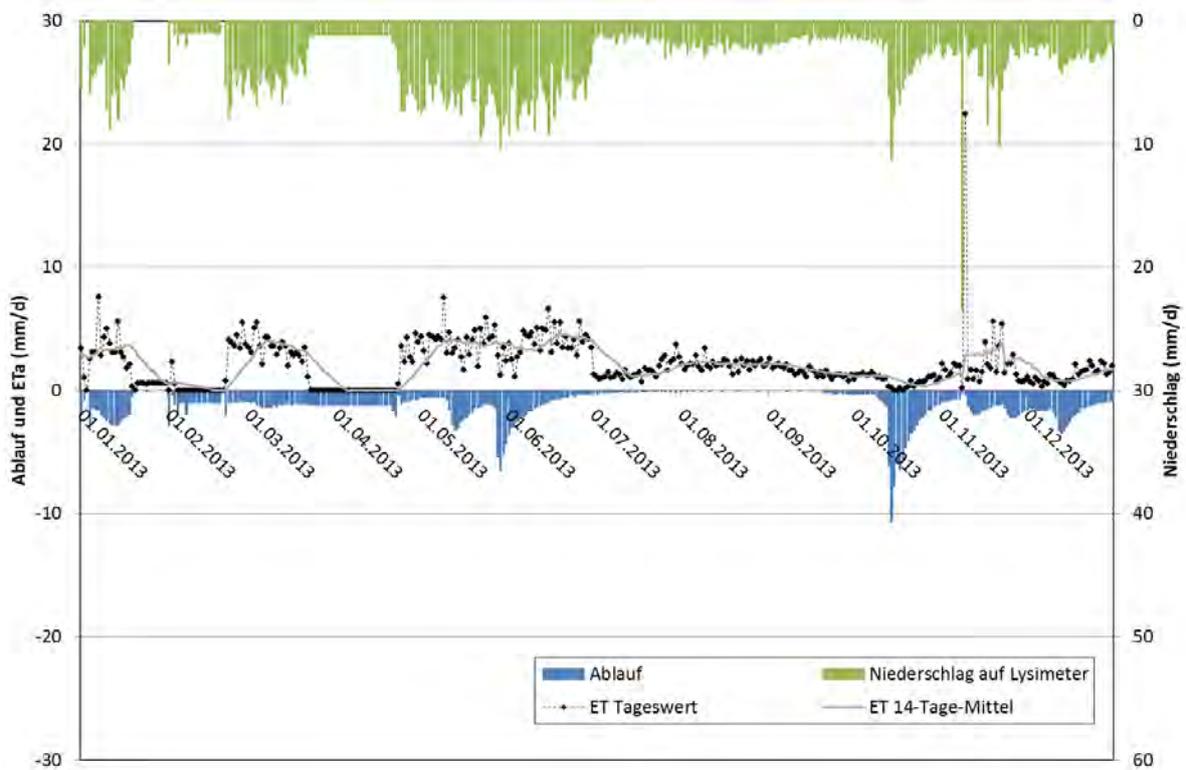
**Abbildung ah12:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 7, 2013, Lysimeterstation Colbitz.



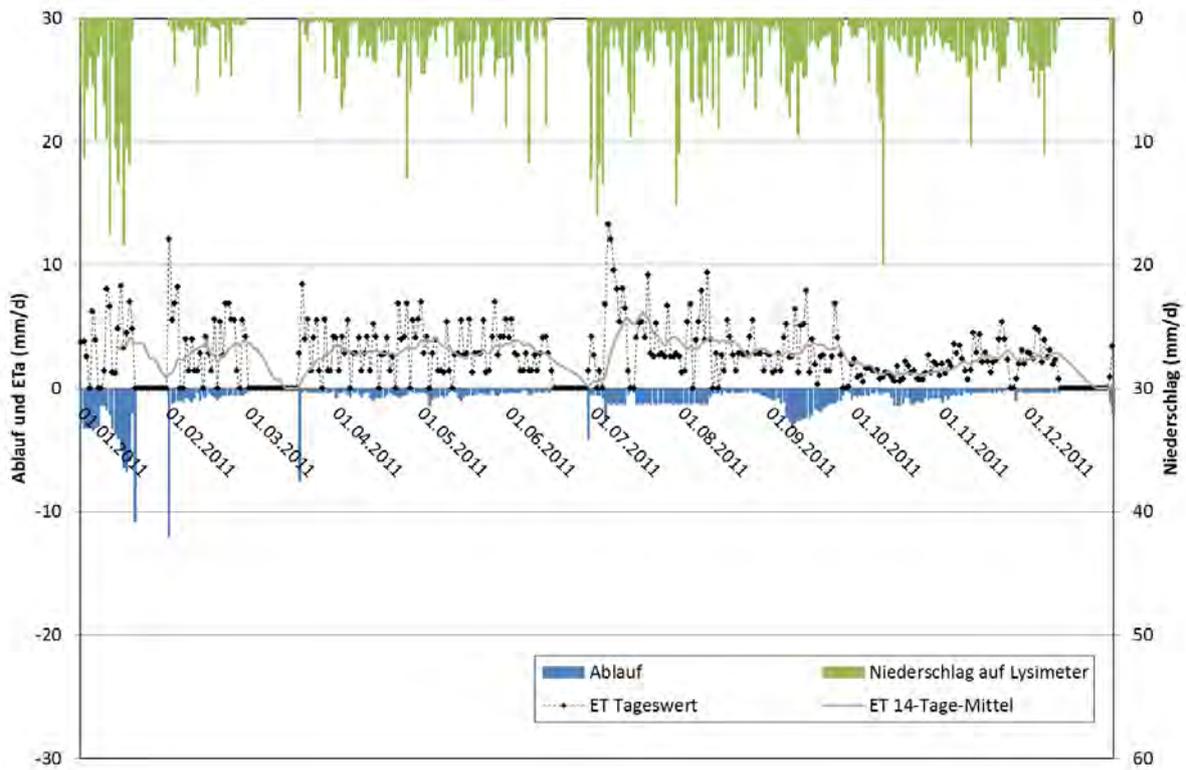
**Abbildung ah13:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 8, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



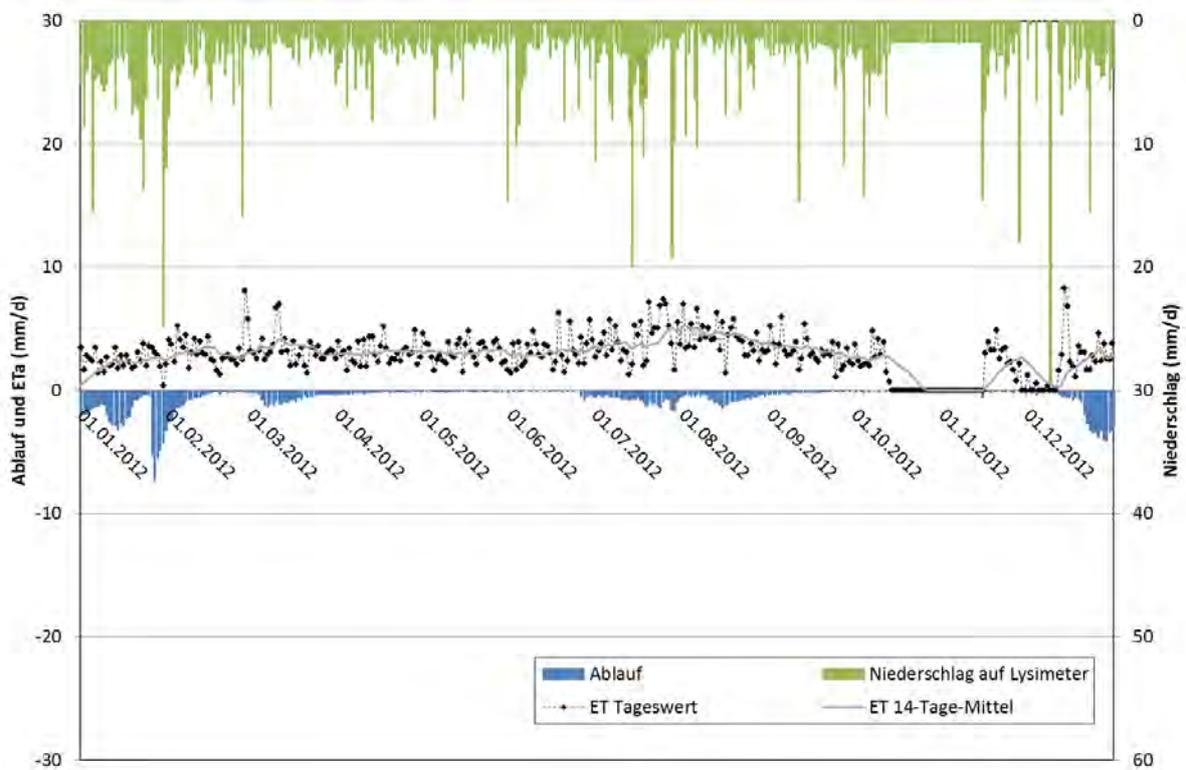
**Abbildung ah14:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 8, 2012, Lysimeterstation Colbitz.



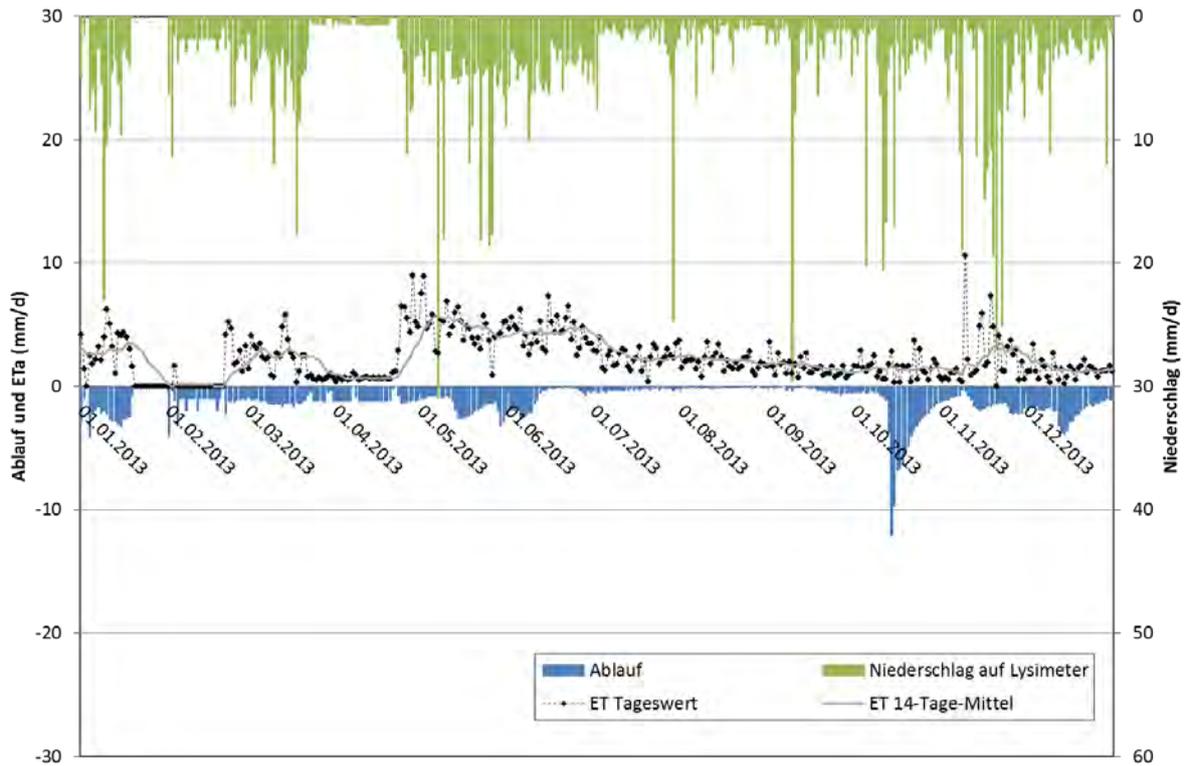
**Abbildung ah15:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 8, 2013, Lysimeterstation Colbitz.



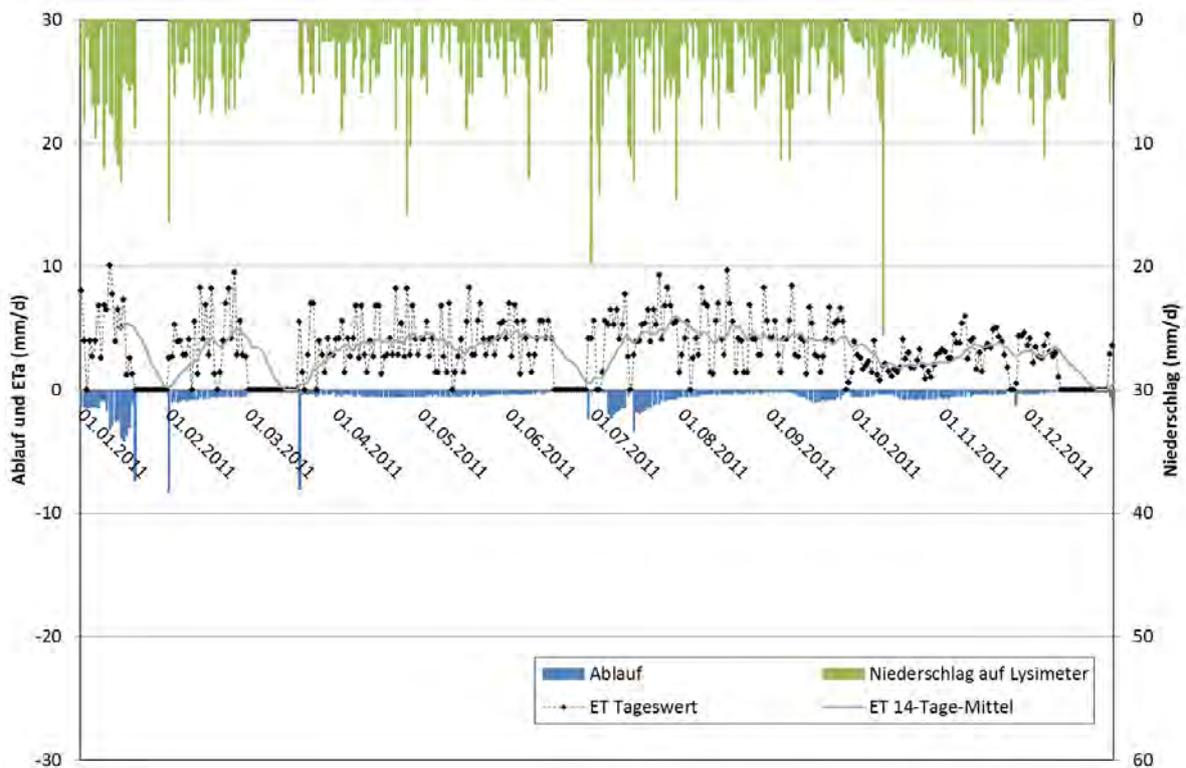
**Abbildung ah16:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 9, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



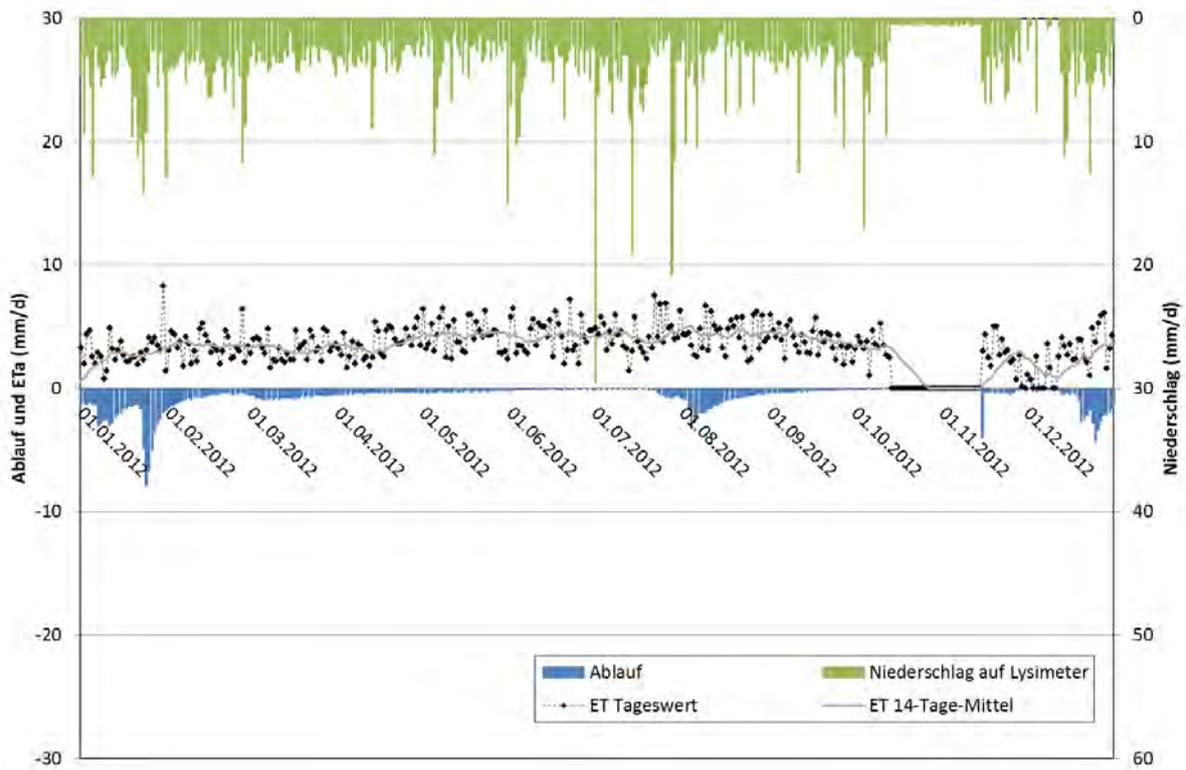
**Abbildung ah17:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 9, 2012, Lysimeterstation Colbitz.



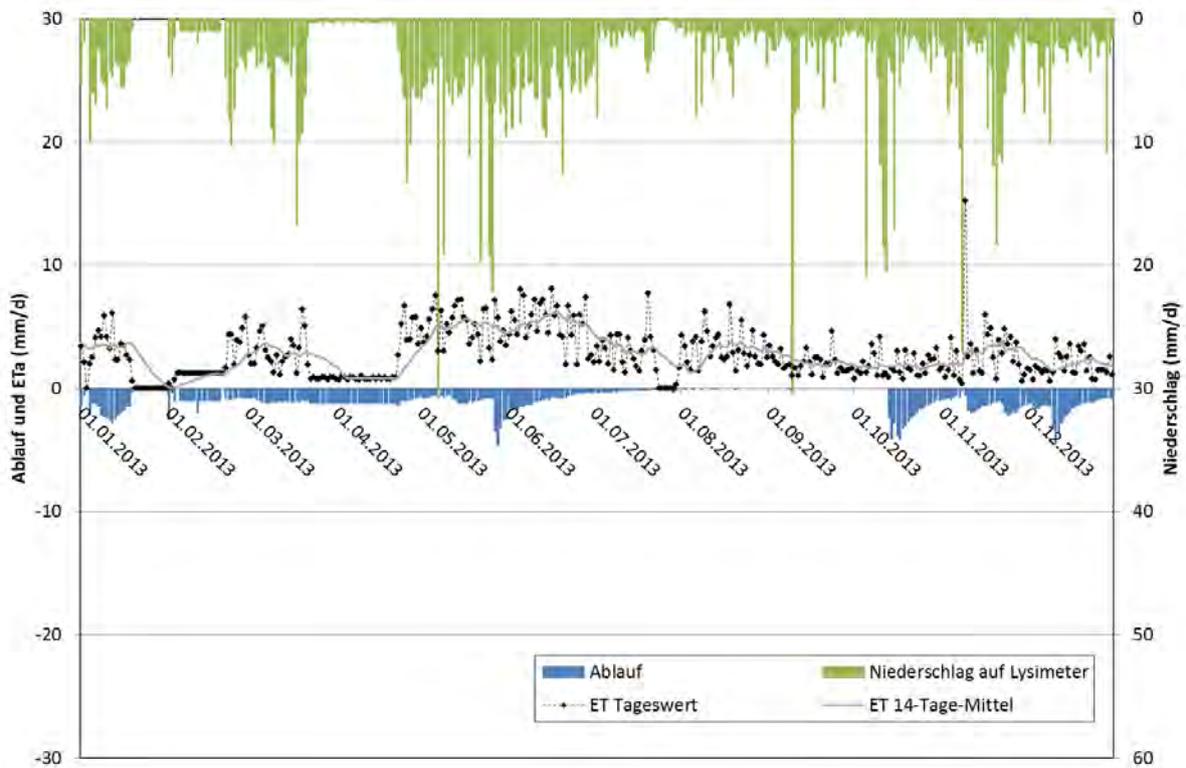
**Abbildung ah18:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 9, 2013, Lysimeterstation Colbitz.



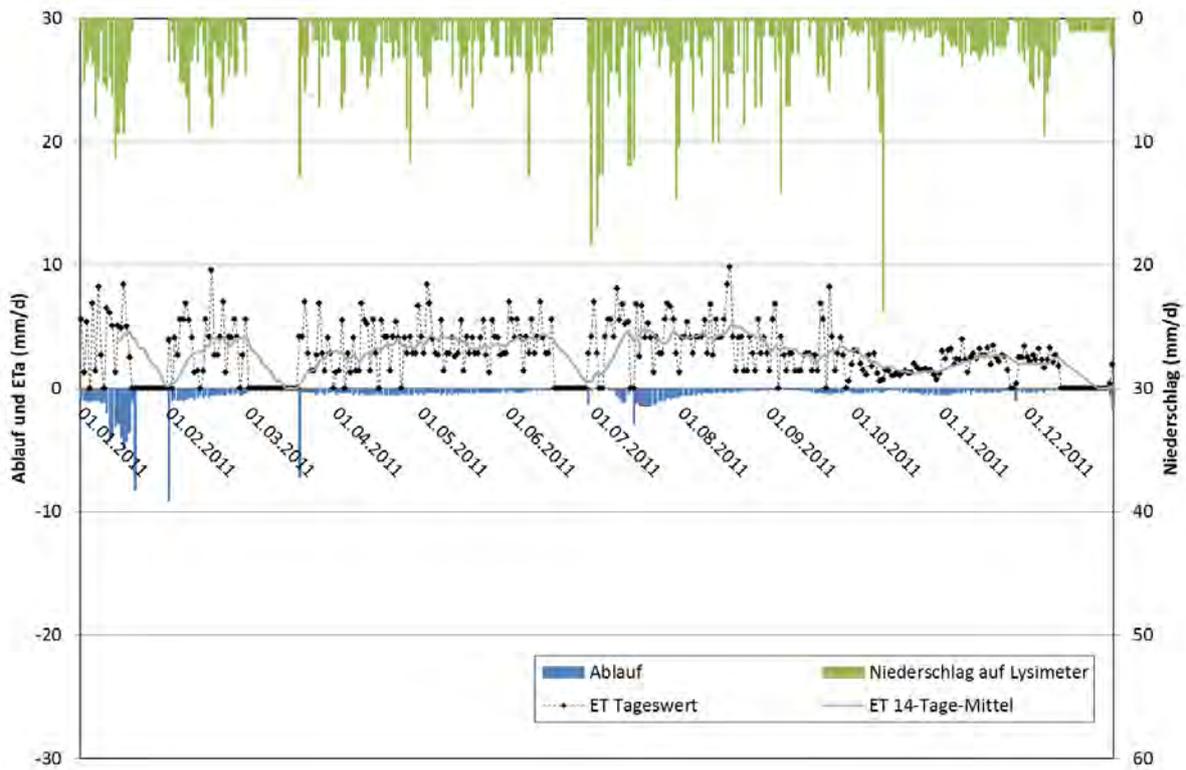
**Abbildung ah19:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 10, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



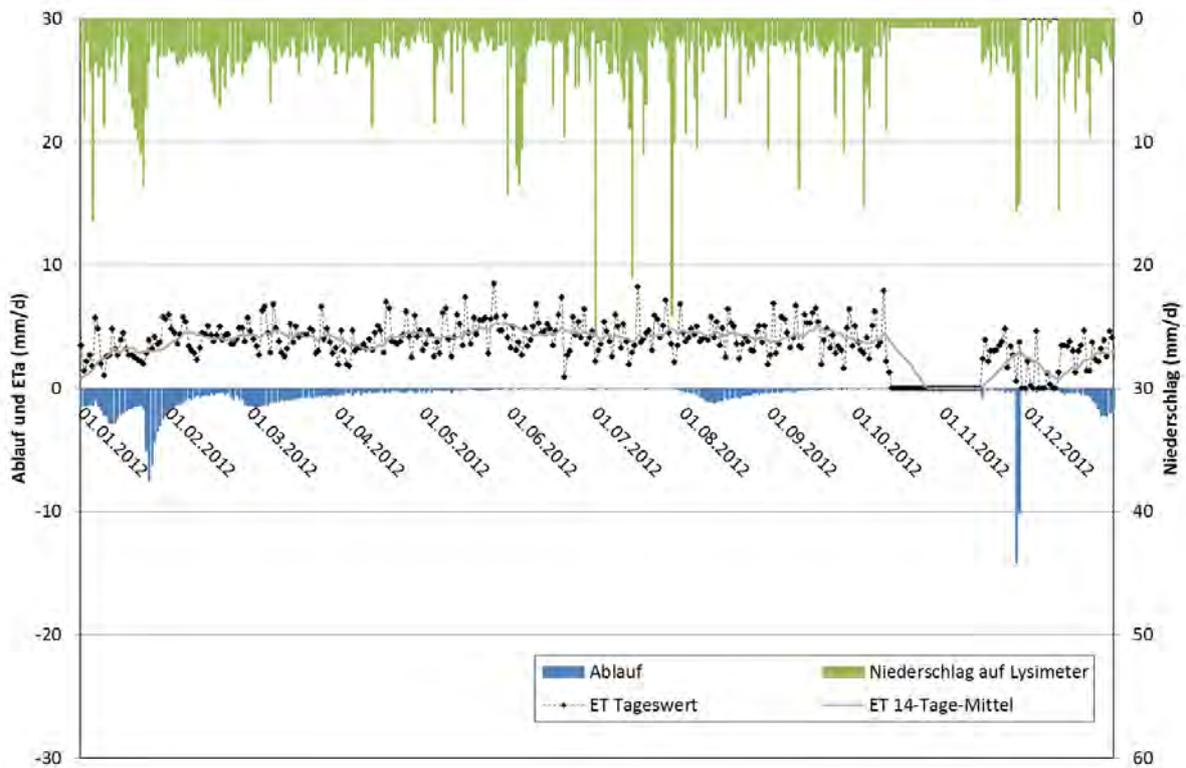
**Abbildung ah20:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 10, 2012, Lysimeterstation Colbitz.



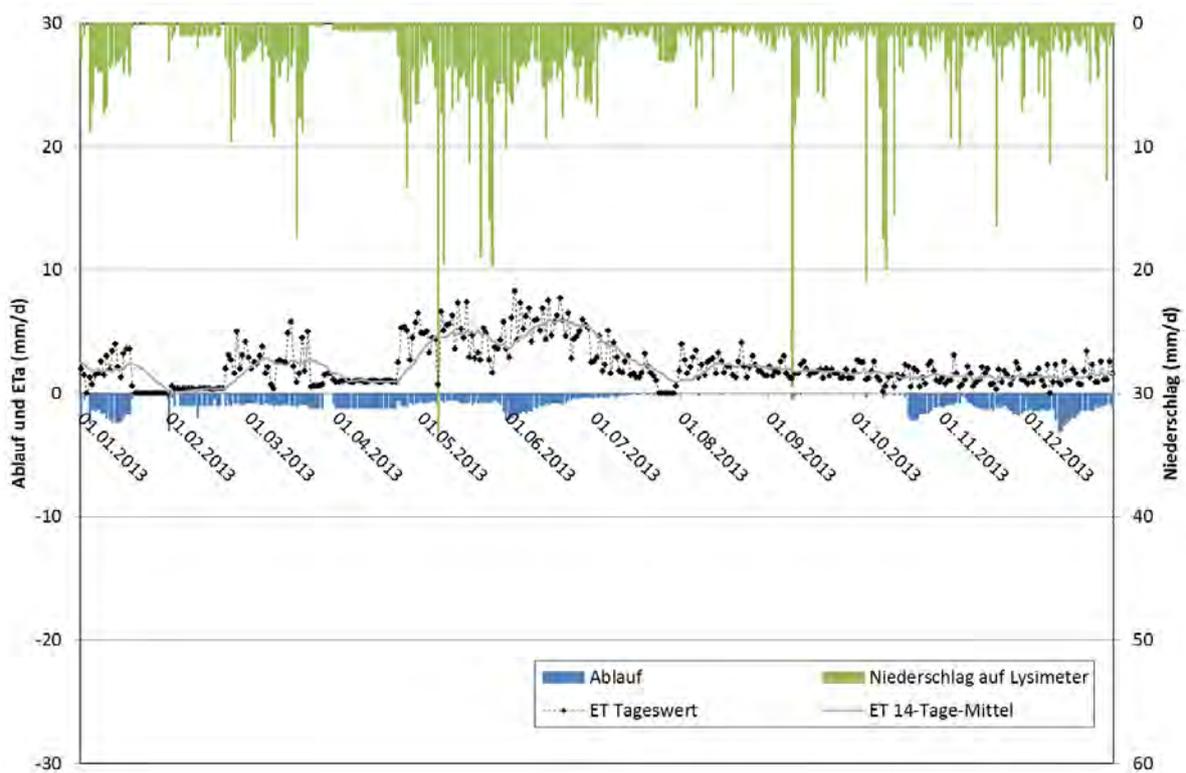
**Abbildung ah21:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 10, 2013, Lysimeterstation Colbitz.



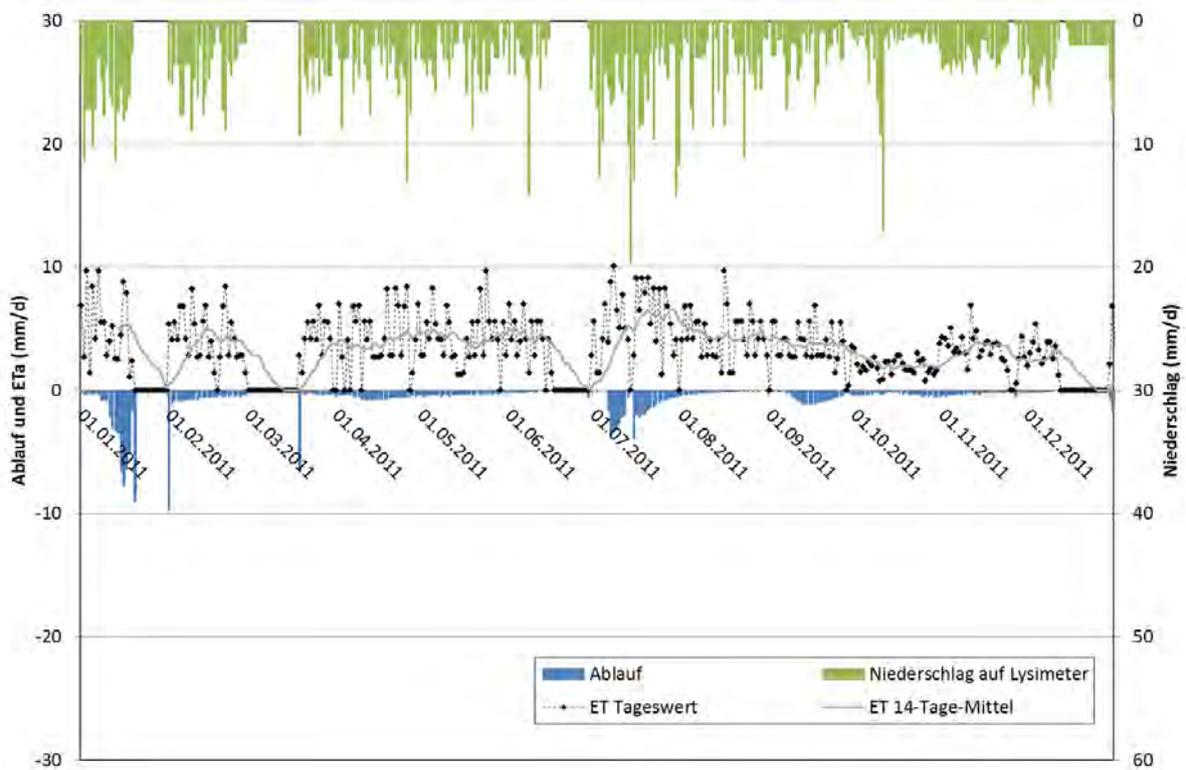
**Abbildung ah22:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 11, 2011, Lysimeterstation Colbitz.



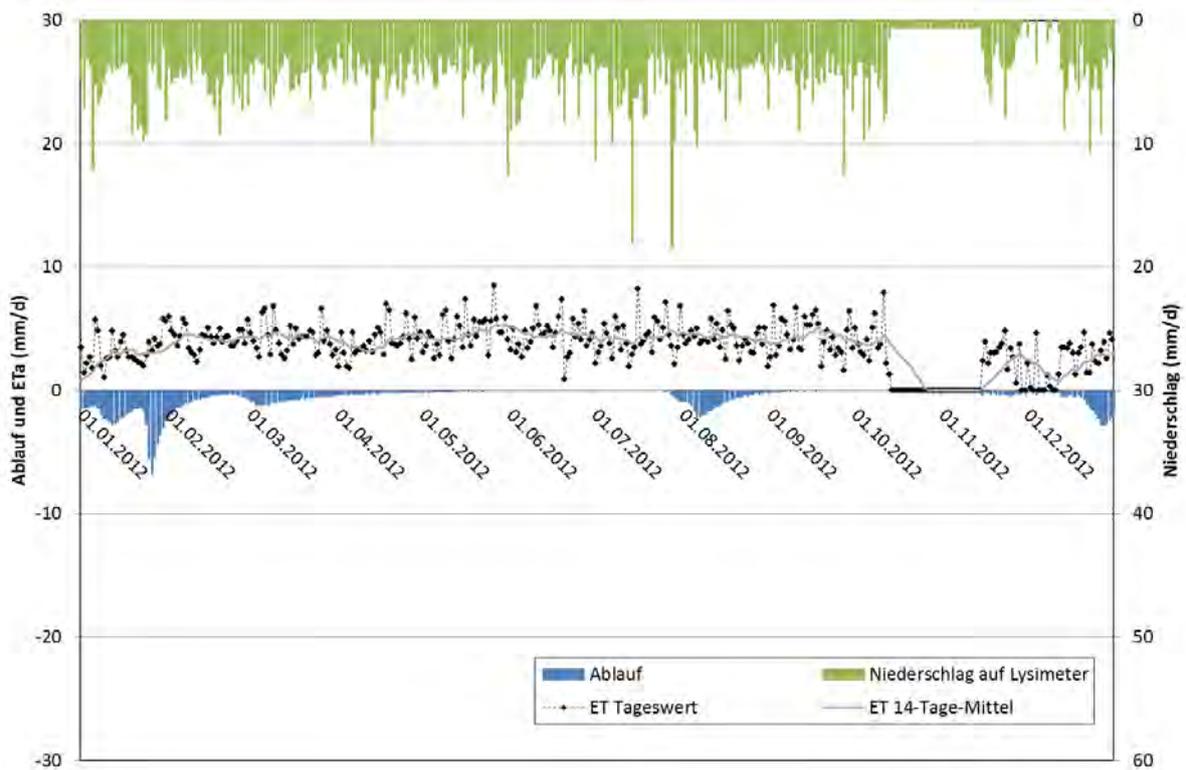
**Abbildung ah23:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 11, 2012, Lysimeterstation Colbitz.



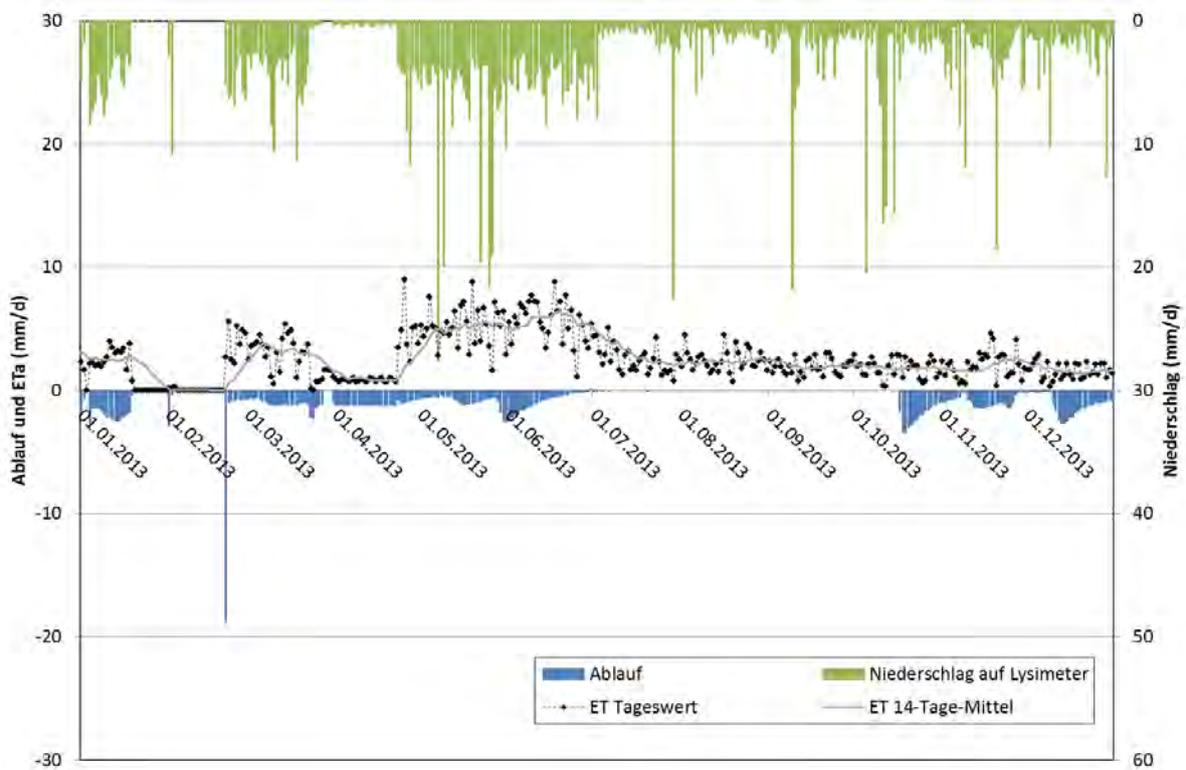
**Abbildung ah24:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 11, 2013, Lysimeterstation Colbitz.



**Abbildung ah25:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 12, 2011, Lysimeterstation Colbitz.

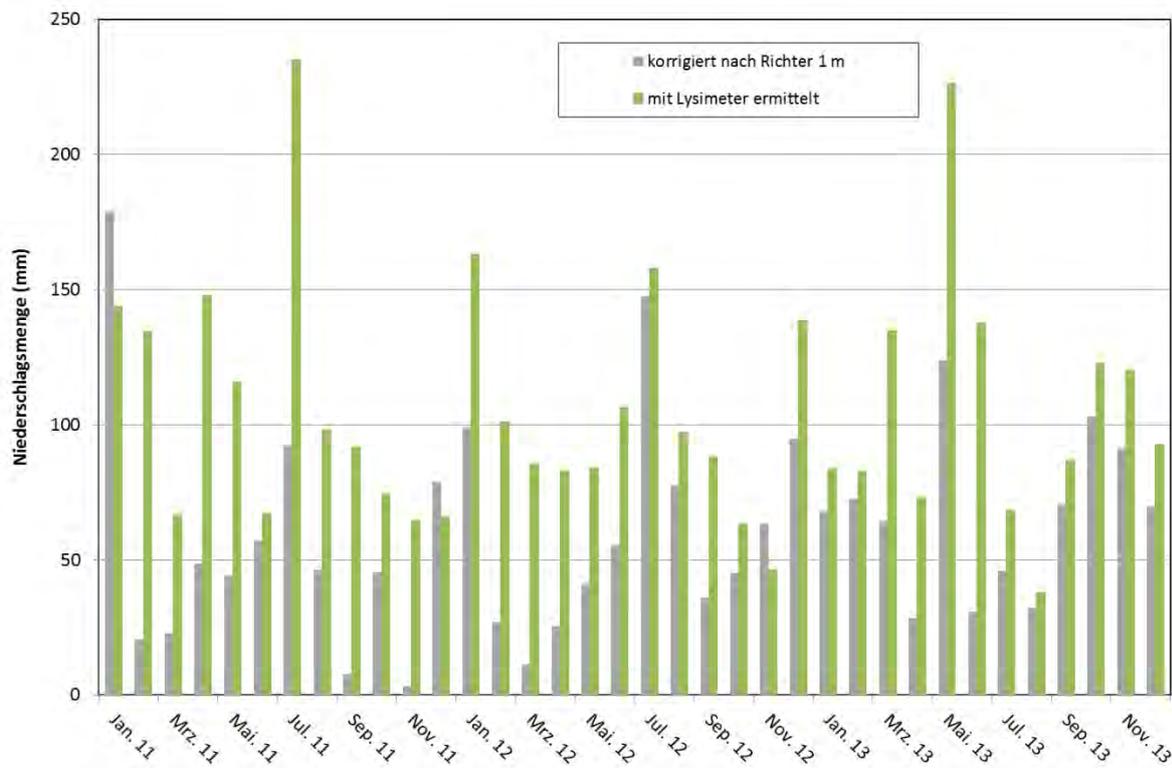


**Abbildung ah26:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 12, 2012, Lysimeterstation Colbitz.

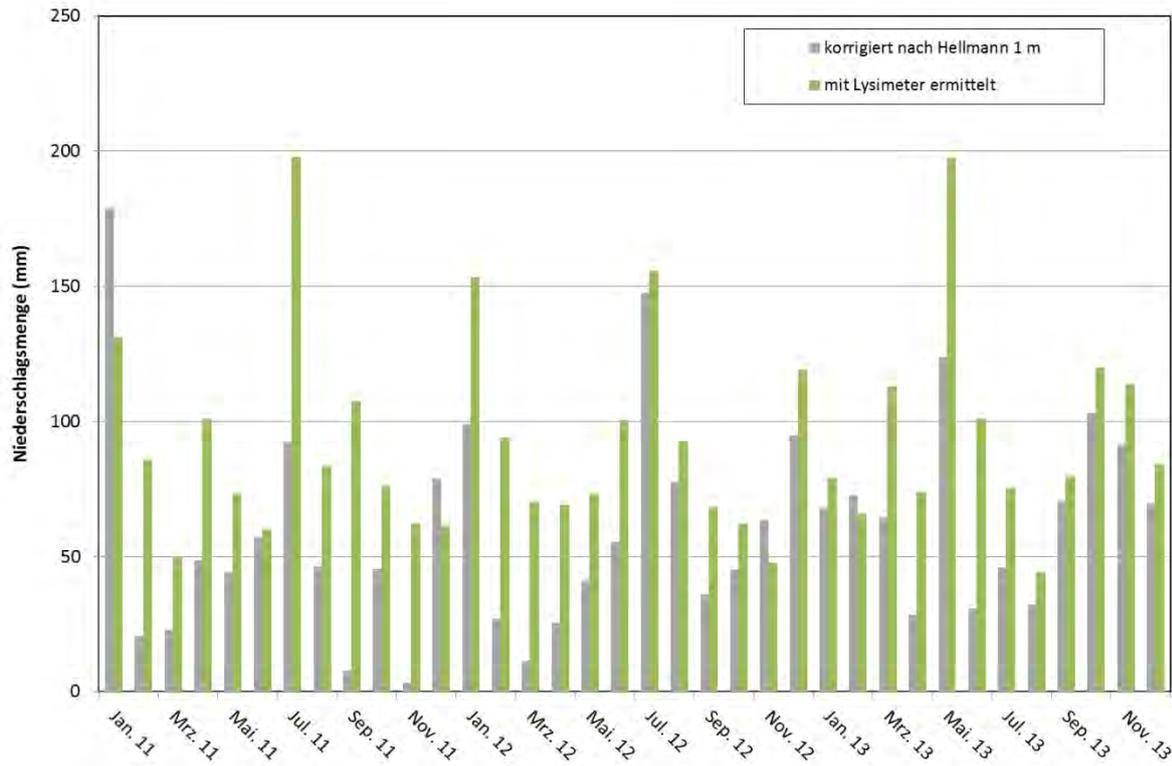


**Abbildung ah27:** Verlauf der Parameter des Wasserhaushaltes von Lysimeter 12, 2013, Lysimeterstation Colbitz.

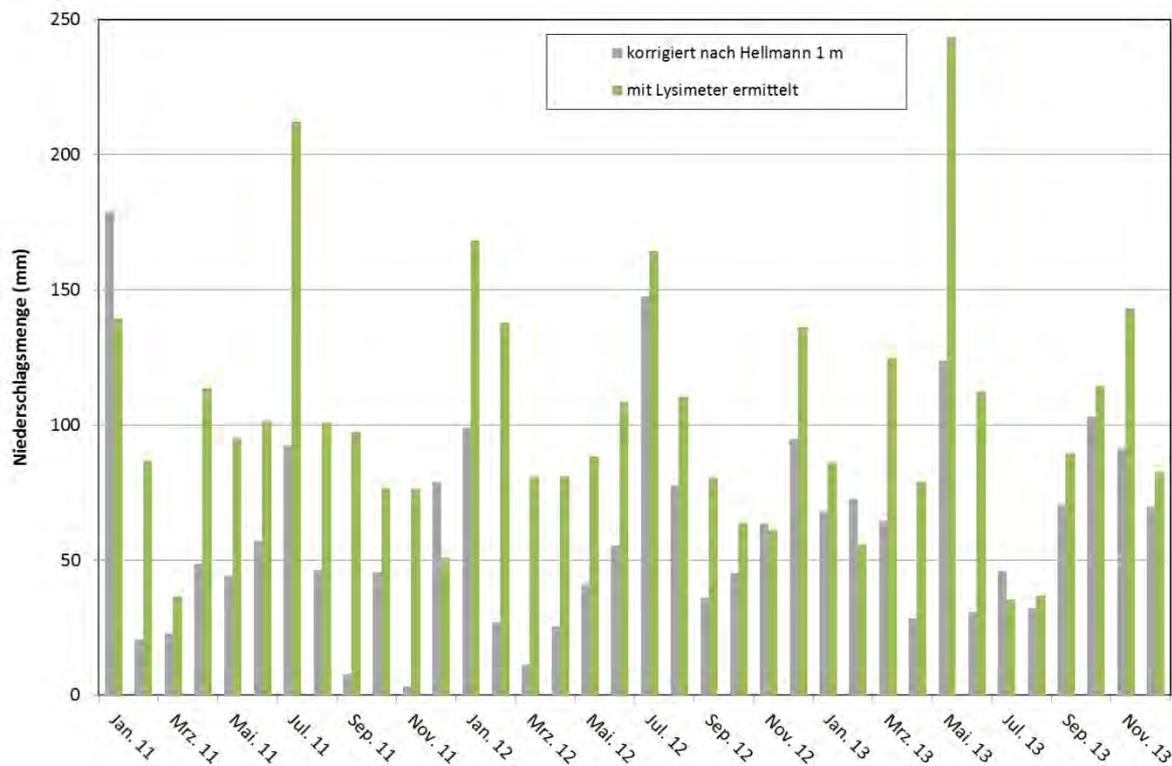
**Anlage 2: Vergleiche der mit den Lysimetern ermittelten Niederschläge der Lysimeter 2 bis Lysimeter 11 mit dem nach Hellmann ermittelten und nach Richter korrigierten Niederschlag (Abbildungen ah28 bis ah38)**



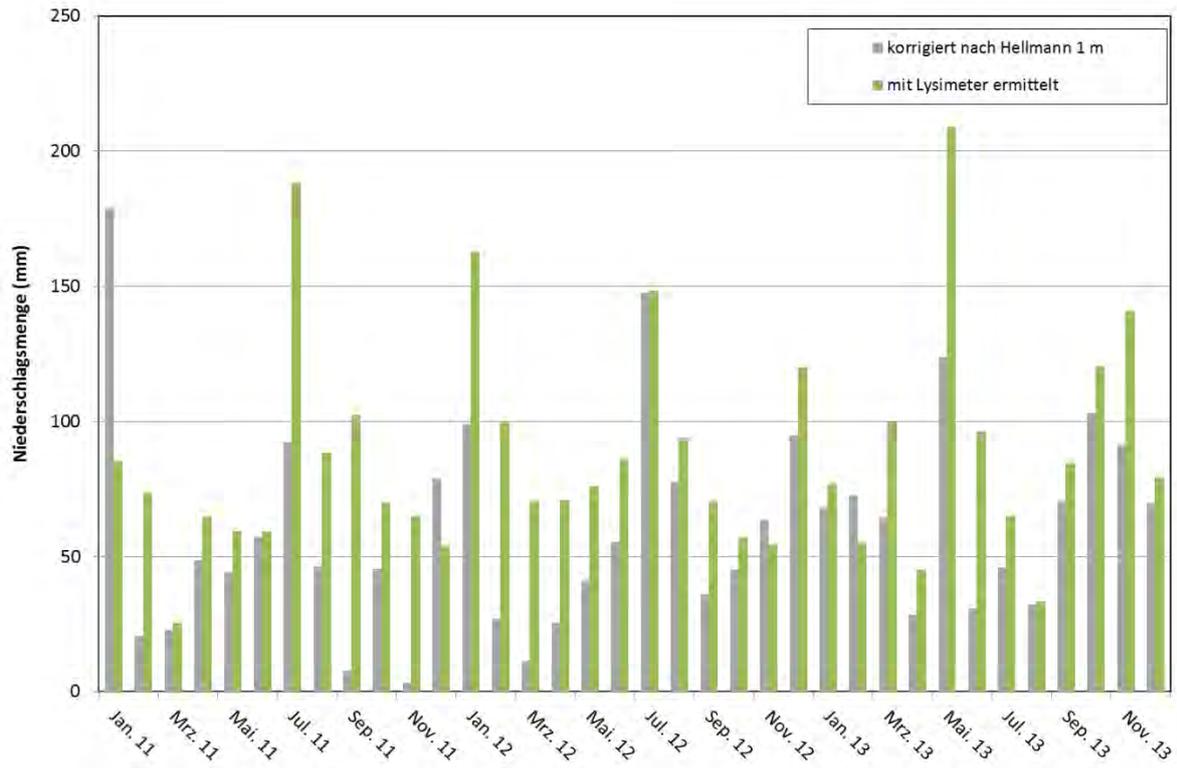
**Abbildung ah28:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 2 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.



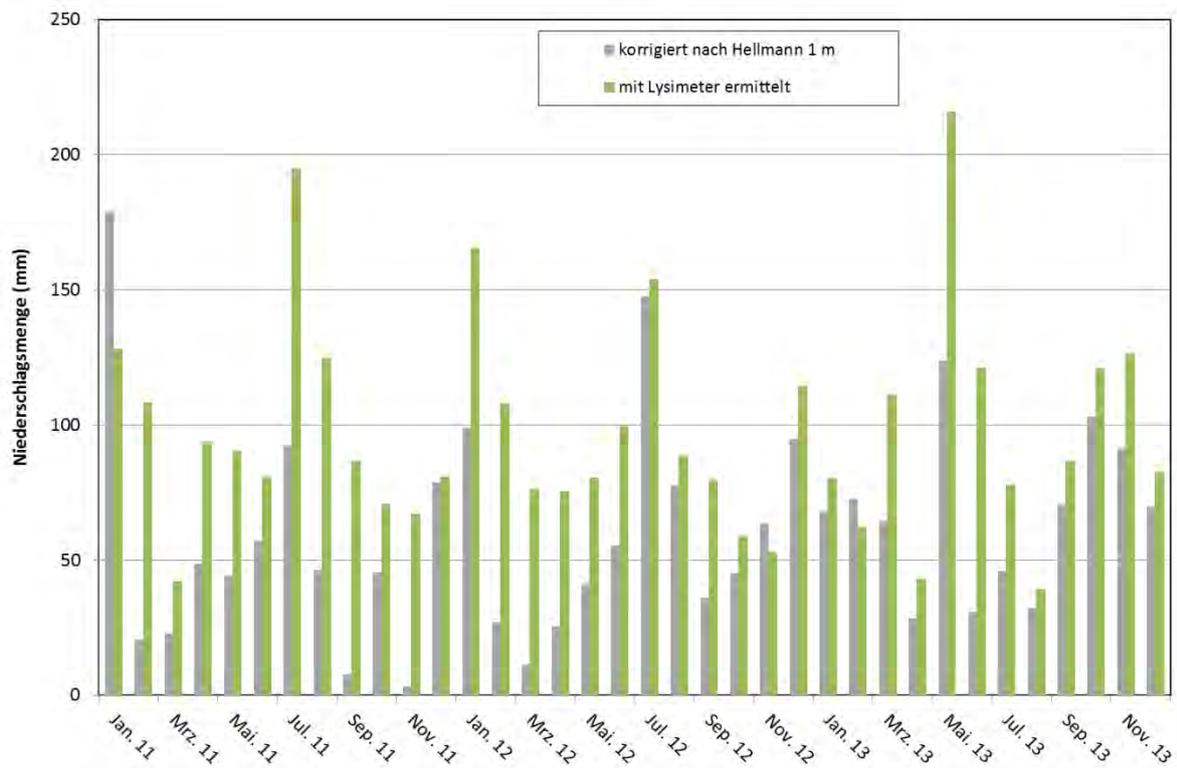
**Abbildung ah29:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 3 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.



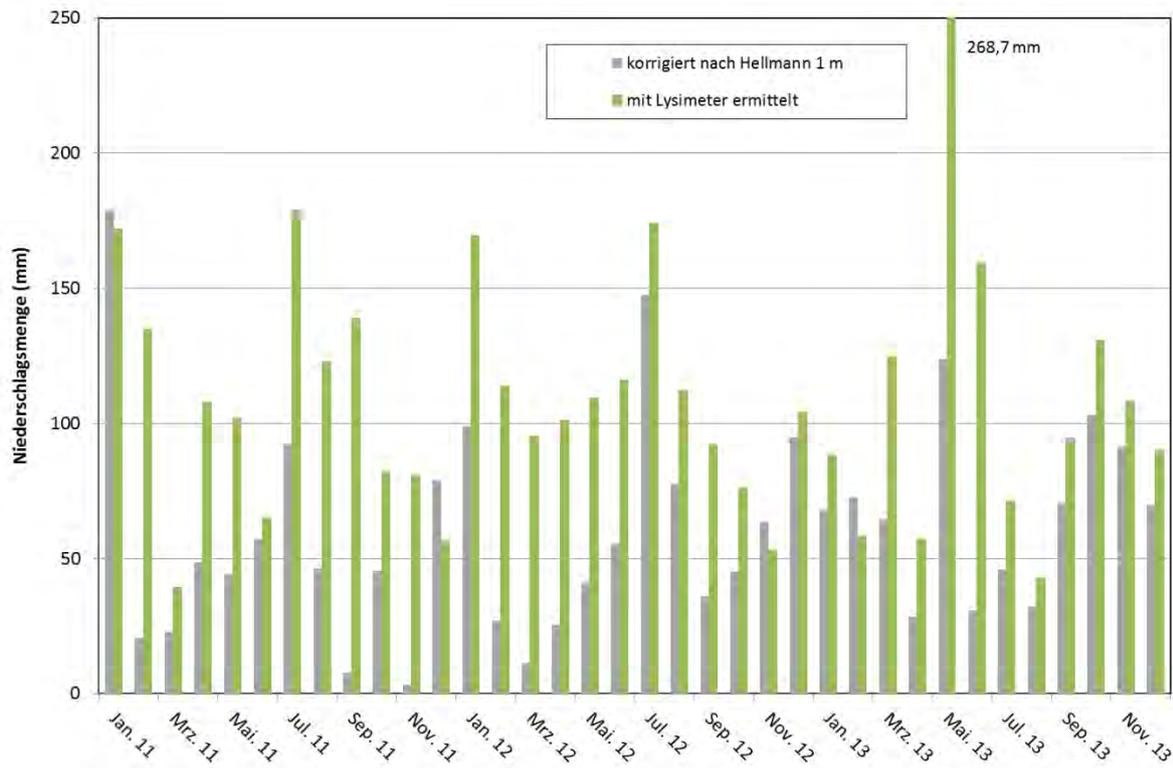
**Abbildung ah30:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 4 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.



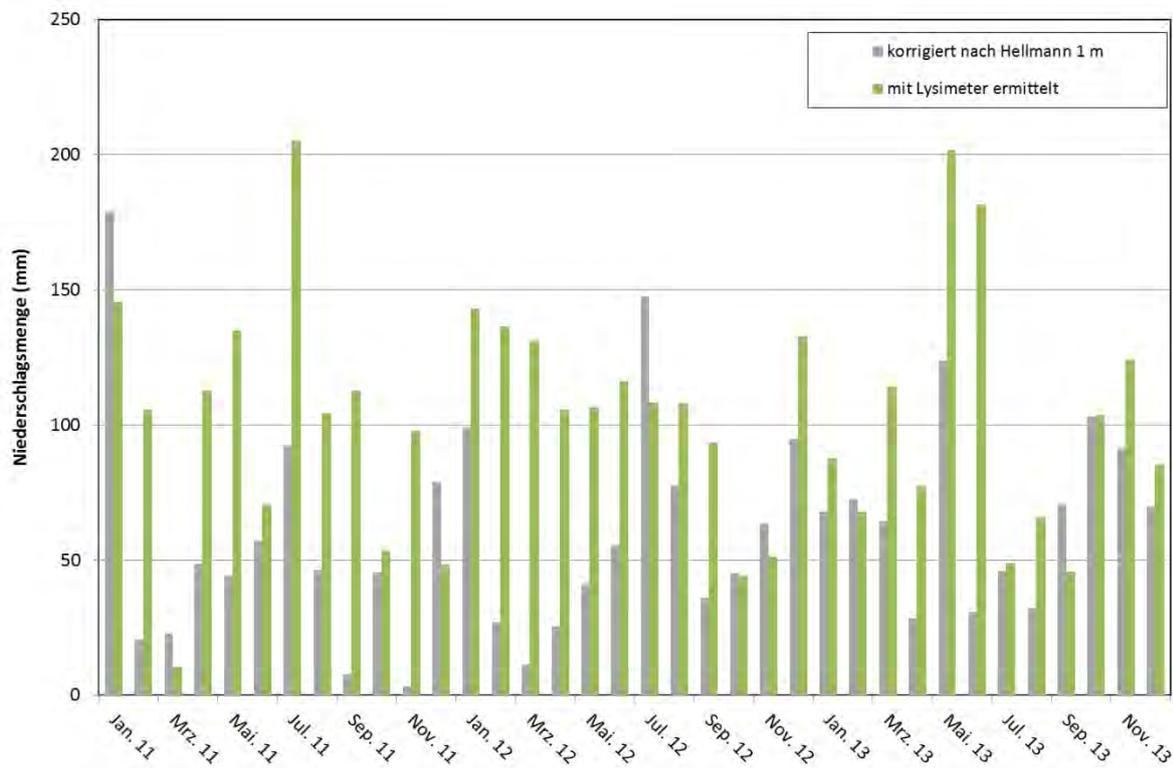
**Abbildung ah31:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 5 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.



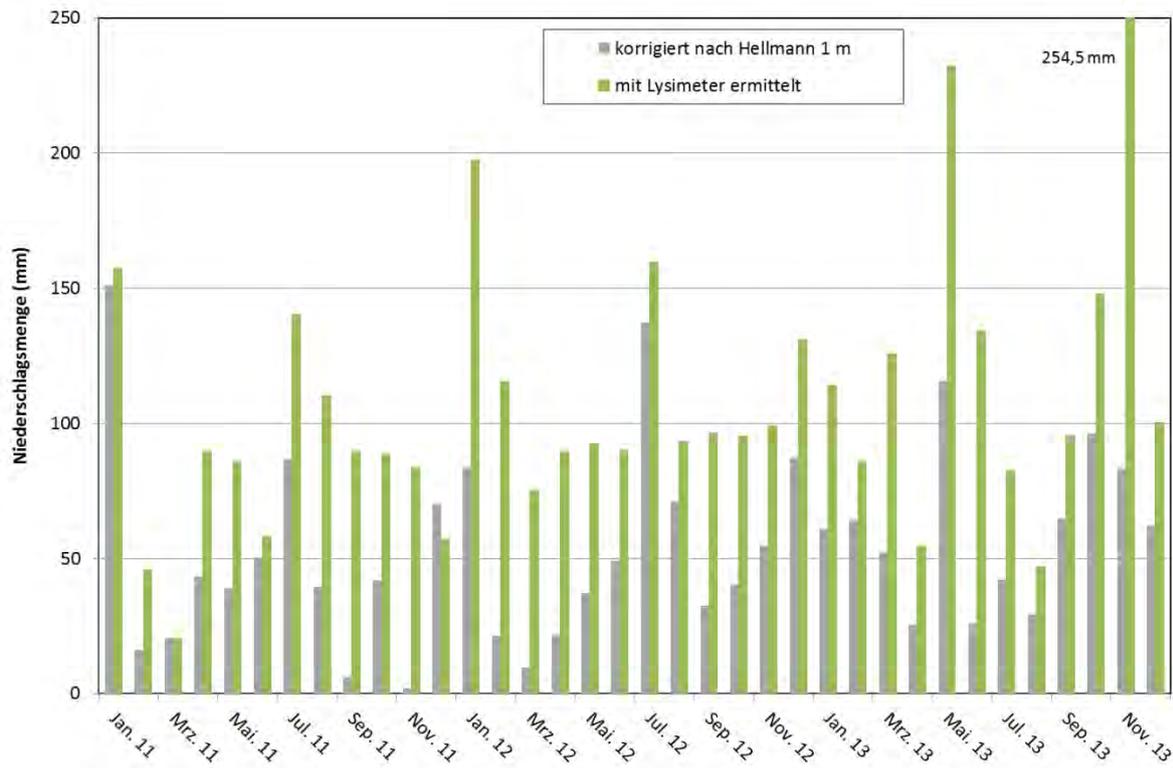
**Abbildung ah32:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 6 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.



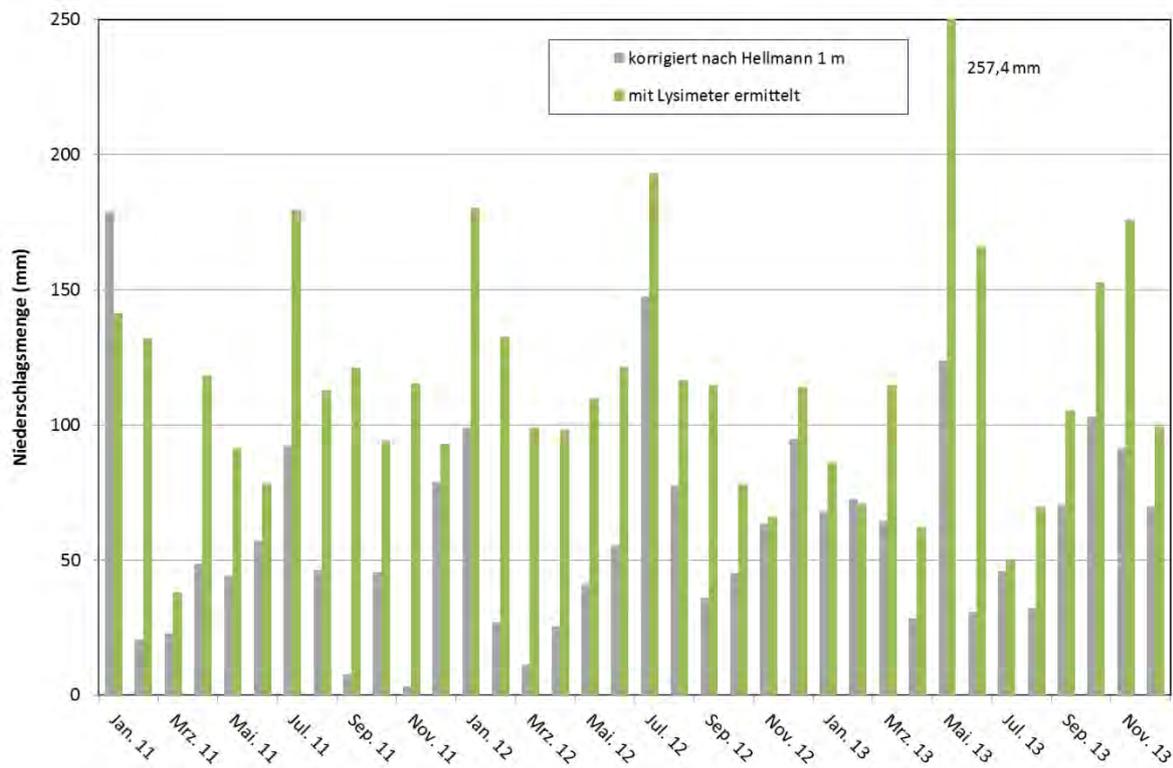
**Abbildung ah33:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 7 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.



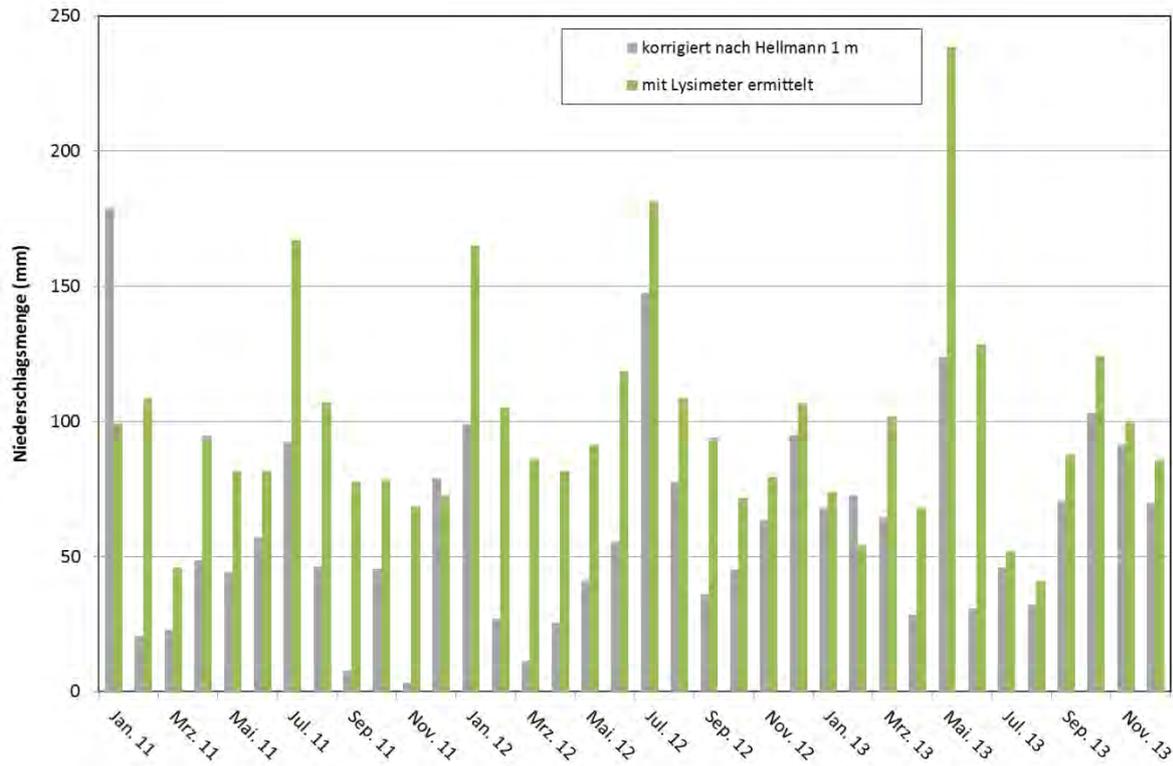
**Abbildung ah34:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 8 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.



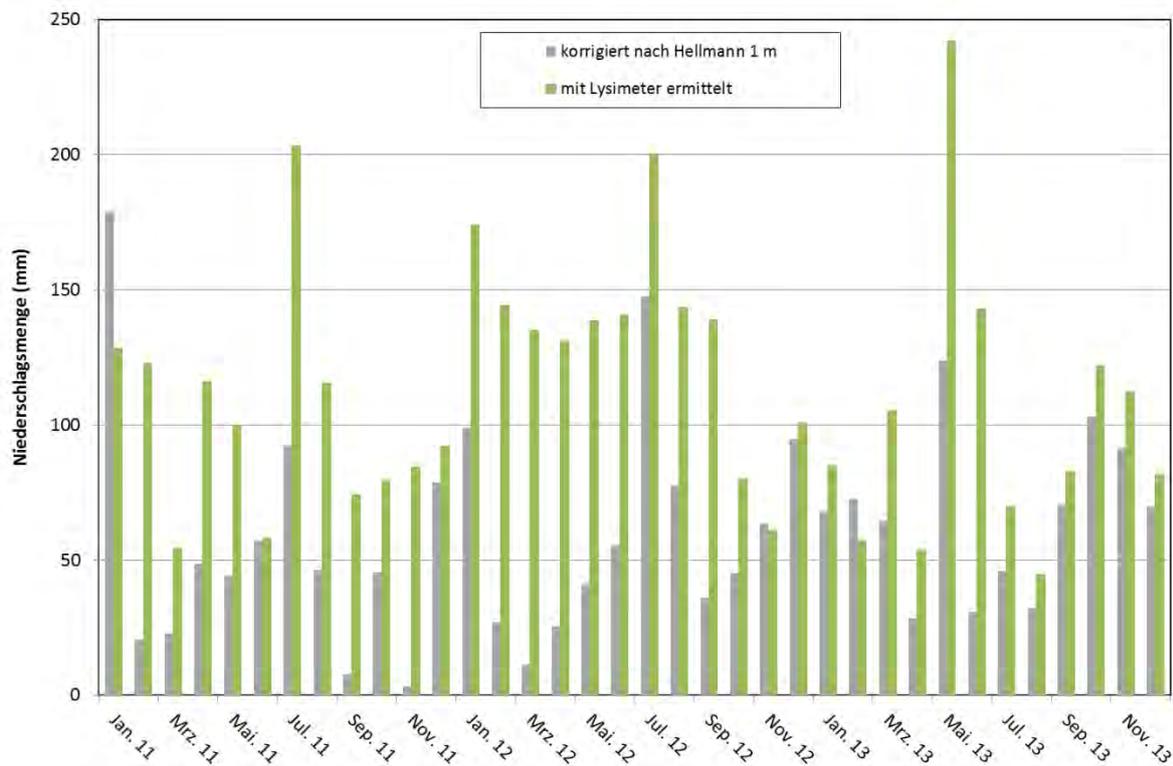
**Abbildung ah35:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 9 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.



**Abbildung ah36:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 10 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.



**Abbildung ah37:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 11 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.



**Abbildung ah38:** Vergleich der monatlichen Niederschlagsmengen 2011, 2012 und 2013: Lysimeter 12 und mit Hellmann-Regenmesser, korrigiert nach Richter.

**Anlage 3: Monatliche Wasserbilanzen der Lysimeter 4 bis Lysimeter 12 in Tabellenform** (Lysimeter 1 bis 3 im Textteil)

*Lysimeter 4, 2011*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	139	87	37	113	95	101	212	101	97	76	76	51	<b>1186</b>
ET	76	77	36	108	96	76	125	101	92	54	73	28	<b>942</b>
Ablauf	76	21	10	17	17	13	93	19	41	15	8	4	<b>333</b>
$\Delta Sp$	-13	-11	-10	-11	-18	13	-6	-18	-36	7	-5	18	<b>-83</b>

*Lysimeter 4, 2012*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	168	138	81	81	88	108	164	110	80	64	61	136	<b>1280</b>
ET	73	101	86	86	103	110	118	122	90	33	36	68	<b>1026</b>
Ablauf	62	31	20	9	6	3	15	34	3	1	2	24	<b>210</b>
$\Delta Sp$	33	5	-26	-14	-21	-4	31	-46	-13	30	24	44	<b>43</b>

*Lysimeter 4, 2013*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	86	56	125	79	243	112	35	37	89	114	143	82	<b>1202</b>
ET	44	40	85	72	141	148	59	65	49	46	77	44	<b>870</b>
Ablauf	32	27	31	31	41	37	5	2	1	48	32	46	<b>330</b>
$\Delta Sp$	10	-11	9	-25	62	-72	-28	-31	39	21	34	-7	<b>1</b>

*Lysimeter 5, 2011*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	85	73	25	64	59	59	188	88	102	70	65	54	<b>933</b>
ET	94	81	34	84	75	37	120	100	94	46	57	25	<b>848</b>
Ablauf	0	1	0	0	10	8	91	8	36	12	9	4	<b>178</b>
$\Delta Sp$	-9	-8	-8	-20	-25	14	-23	-20	-28	11	-1	24	<b>-93</b>

*Lysimeter 5, 2012*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	163	99	70	71	76	86	148	94	70	57	54	120	<b>1108</b>
ET	64	68	73	71	91	92	113	109	82	26	31	54	<b>873</b>
Ablauf	80	20	19	10	7	4	12	37	6	1	3	28	<b>226</b>
$\Delta Sp$	19	11	-21	-10	-21	-10	24	-52	-18	30	21	37	<b>9</b>

*Lysimeter 5, 2013*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	77	55	100	45	209	96	65	33	85	120	141	79	<b>1103</b>
ET	38	27	56	50	132	147	59	47	41	42	76	39	<b>754</b>
Ablauf	36	30	36	34	42	29	5	3	2	60	30	53	<b>359</b>
$\Delta Sp$	2	-2	8	-39	34	-80	1	-16	41	18	35	-13	<b>-10</b>

*Lysimeter 6, 2011*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	128	108	42	94	90	81	195	124	86	71	67	81	<b>1167</b>
ET	75	82	43	85	98	61	132	121	86	43	77	43	<b>946</b>
Ablauf	74	25	9	11	12	7	93	11	42	17	9	4	<b>313</b>
$\Delta$ Sp	-21	1	-10	-1	-20	13	-31	-7	-42	10	-19	34	<b>-92</b>

*Lysimeter 6, 2012*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	165	108	76	76	80	99	154	89	80	59	53	114	<b>1152</b>
ET	73	89	82	81	97	108	112	117	84	28	33	57	<b>960</b>
Ablauf	77	20	17	9	5	2	9	37	5	1	5	29	<b>217</b>
$\Delta$ Sp	15	-1	-22	-14	-22	-11	34	-65	-10	30	14	29	<b>-25</b>

*Lysimeter 6, 2013*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	80	62	111	43	216	121	78	39	87	121	126	82	<b>1166</b>
ET	34	23	71	57	139	150	63	61	43	42	45	36	<b>764</b>
Ablauf	35	29	34	32	47	28	4	2	1	72	34	53	<b>370</b>
$\Delta$ Sp	11	10	6	-45	30	-57	12	-24	42	6	47	-7	<b>32</b>

*Lysimeter 7, 2011*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	172	135	39	108	102	65	179	123	139	82	81	56	<b>1281</b>
ET	92	110	36	103	116	61	88	124	124	48	79	40	<b>1020</b>
Ablauf	60	27	10	13	13	7	94	14	44	21	8	4	<b>315</b>
$\Delta$ Sp	20	-2	-7	-8	-27	-3	-3	-15	-29	14	-6	13	<b>-54</b>

*Lysimeter 7, 2012*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	170	114	95	101	109	116	174	112	92	76	53	104	<b>1316</b>
ET	82	90	99	102	107	119	139	152	103	37	31	66	<b>1127</b>
Ablauf	77	21	23	9	8	12	16	23	1	0	0	38	<b>227</b>
$\Delta$ Sp	12	2	-27	-10	-5	-15	19	-63	-11	39	22	0	<b>-38</b>

*Lysimeter 7, 2013*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	88	58	124	57	269	159	71	43	95	131	108	90	<b>1294</b>
ET	45	24	80	55	143	151	82	69	50	46	43	42	<b>830</b>
Ablauf	37	31	37	36	57	35	3	0	0	75	37	53	<b>400</b>
$\Delta$ Sp	7	4	8	-33	69	-27	-14	-26	44	10	28	-6	<b>64</b>

*Lysimeter 8, 2011*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	145	106	10	113	135	70	205	104	113	54	98	48	<b>1200</b>
ET	59	101	49	129	119	61	104	90	69	41	73	37	<b>932</b>
Ablauf	70	28	11	13	13	9	102	18	45	22	10	6	<b>346</b>
$\Delta$ Sp	16	-24	-49	-29	3	0	-1	-4	-1	-9	15	6	<b>-78</b>

*Lysimeter 8, 2012*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	143	136	131	105	106	116	108	108	94	44	51	133	<b>1275</b>
ET	71	100	96	95	94	102	81	75	93	52	41	61	<b>964</b>
Ablauf	82	24	24	8	7	11	25	33	2	0	5	48	<b>268</b>
$\Delta$ Sp	-10	12	11	2	6	3	2	0	-2	-9	5	23	<b>44</b>

*Lysimeter 8, 2013*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	87	68	114	77	202	181	49	66	45	104	124	85	<b>1202</b>
ET	65	32	73	24	118	121	49	66	45	24	79	38	<b>735</b>
Ablauf	38	31	37	34	59	36	4	1	3	80	41	53	<b>417</b>
$\Delta$ Sp	-15	4	4	19	24	24	-4	-1	-3	-1	4	-6	<b>50</b>

*Lysimeter 9, 2011*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	157	46	21	90	86	58	140	110	90	88	83	57	<b>1027</b>
ET	71	106	46	98	100	49	140	104	84	41	71	39	<b>946</b>
Ablauf	77	32	11	16	17	10	34	21	47	24	12	7	<b>308</b>
$\Delta$ Sp	9	-92	-36	-24	-31	0	-34	-14	-41	24	0	12	<b>-228</b>

*Lysimeter 9, 2012*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	197	116	75	90	92	90	160	94	96	95	99	131	<b>1336</b>
ET	76	97	102	93	96	97	130	130	94	35	37	65	<b>1051</b>
Ablauf	73	18	20	5	3	4	26	21	5	1	2	43	<b>219</b>
$\Delta$ Sp	49	1	-46	-8	-6	-11	4	-58	-2	60	60	23	<b>65</b>

*Lysimeter 9, 2013*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	114	86	126	55	232	134	82	47	96	148	255	100	<b>1474</b>
ET	58	27	62	60	148	132	74	60	44	47	71	41	<b>825</b>
Ablauf	44	37	37	32	51	27	9	4	9	90	43	62	<b>444</b>
$\Delta$ Sp	12	22	27	-37	34	-25	-1	-17	43	11	141	-3	<b>205</b>

*Lysimeter 10, 2011*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	141	132	38	118	91	78	179	113	121	95	115	93	<b>1315</b>
ET	91	115	42	125	120	78	147	136	117	66	99	43	<b>1179</b>
Ablauf	48	27	12	16	14	7	36	11	16	18	12	5	<b>223</b>
$\Delta$ Sp	2	-10	-16	-22	-43	-7	-4	-34	-12	10	4	45	<b>-88</b>

*Lysimeter 10, 2012*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	180	132	99	98	110	121	193	116	115	78	66	114	<b>1422</b>
ET	94	101	101	108	132	129	137	135	115	45	42	79	<b>1219</b>
Ablauf	79	21	23	12	8	3	7	37	7	1	8	35	<b>240</b>
$\Delta$ Sp	7	11	-25	-22	-31	-10	49	-55	-8	32	15	-1	<b>-37</b>

*Lysimeter 10, 2013*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	86	71	115	62	257	166	50	69	105	153	176	99	<b>1409</b>
ET	60	52	73	56	155	161	73	102	61	58	89	58	<b>998</b>
Ablauf	32	26	33	34	38	28	6	1	0	43	40	49	<b>331</b>
$\Delta$ Sp	-6	-8	8	-28	64	-23	-29	-33	44	52	47	-8	<b>80</b>

*Lysimeter 11, 2011*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	99	109	46	95	81	81	167	107	77	78	68	72	<b>1082</b>
ET	76	106	42	99	113	77	130	129	84	47	71	31	<b>1006</b>
Ablauf	52	27	11	14	12	5	26	10	7	10	10	5	<b>188</b>
$\Delta$ Sp	-29	-25	-7	-18	-43	0	11	-32	-14	21	-12	36	<b>-113</b>

*Lysimeter 11, 2012*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	165	105	86	81	91	119	181	108	94	72	79	107	<b>1287</b>
ET	81	87	96	99	112	122	116	133	104	36	31	59	<b>1077</b>
Ablauf	77	25	30	10	4	1	1	21	4	0	27	21	<b>219</b>
$\Delta$ Sp	7	-7	-40	-27	-25	-5	65	-46	-15	36	21	27	<b>-8</b>

*Lysimeter 11, 2013*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	74	54	102	68	238	128	52	41	88	124	99	86	<b>1153</b>
ET	39	31	67	59	137	165	56	70	52	47	40	45	<b>807</b>
Ablauf	32	27	27	33	24	30	4	0	1	21	33	49	<b>281</b>
$\Delta$ Sp	3	-4	8	-24	77	-66	-9	-30	35	57	27	-8	<b>65</b>

*Lysimeter 12, 2011*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	128	123	54	116	100	58	203	116	74	80	84	92	<b>1229</b>
ET	96	120	53	123	131	68	170	139	103	62	96	46	<b>1208</b>
Ablauf	53	26	10	17	11	3	42	5	17	10	7	4	<b>204</b>
$\Delta Sp$	-20	-23	-8	-24	-42	-13	-9	-28	-46	7	-19	42	<b>-183</b>

*Lysimeter 12, 2012*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	174	144	135	131	139	141	200	144	139	80	61	101	<b>1588</b>
ET	100	124	131	119	147	133	133	129	131	51	42	69	<b>1309</b>
Ablauf	77	22	24	7	2	0	3	30	1	0	4	27	<b>198</b>
$\Delta Sp$	-3	-2	-20	5	-11	8	64	-16	7	29	15	5	<b>81</b>

*Lysimeter 12, 2013*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
NS	85	57	105	54	242	143	70	45	83	122	112	82	<b>1200</b>
ET	46	32	79	56	161	168	78	76	58	56	61	49	<b>920</b>
Ablauf	34	28	31	33	28	25	1	0	0	31	27	35	<b>274</b>
$\Delta Sp$	5	-3	-5	-36	54	-51	-9	-31	25	35	24	-3	<b>6</b>