



## 50 Jahre Großlysimeteranlage St. Arnold

Entwicklung der Klima- und Wasserhaushaltsgrößen  
bei unterschiedlicher Vegetation (1965-2014)

LANUV-Fachbericht 91



---

# **50 Jahre Großlysimeteranlage St. Arnold**

Entwicklung der Klima- und Wasserhaushaltsgrößen  
bei unterschiedlicher Vegetation (1965-2014)

[LANUV-Fachbericht 91](#)

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen  
Recklinghausen 2018

---

## IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 Telefax 02361 305-3215 E-Mail: <a href="mailto:poststelle@lanuv.nrw.de">poststelle@lanuv.nrw.de</a>
Bearbeiter	Dietmar Wyrwich (ehem. LANUV), Michael Brandenburg (LANUV)
Titelbild	KNSYphotographie
ISSN	1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachbericht
Informationsdienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter • <a href="http://www.lanuv.nrw.de">www.lanuv.nrw.de</a> Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext
Bereitschaftsdienst	Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV (24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

## Vorwort

Die Bedeutung ausreichender Wasserressourcen ist uns in den letzten Wochen und Monaten des Jahres 2018 mit trockenfallenden Gewässern, dem andauernden Rheinniedrigwasser und den niedrigen Füllständen der Talsperren sehr bewusst geworden. Die letzte Dekade war in Nordrhein-Westfalen gegenüber dem langjährigen Mittelwert bisher deutlich zu warm und zu trocken. Das LANUV verzeichnete daher im Jahr 2018 vielfach historisch tiefe Wasserstände in Grund- und Oberflächenwasser. Für diesen Abgleich sind langjährige Aufzeichnungen des Wasserhaushalts unverzichtbar.

Seit 1965 befassen sich das LANUV bzw. seine Vorläuferinstitutionen in der Großlysimeteranlage St. Arnold mit der detaillierten Untersuchung der Auswirkungen der klimatischen Verhältnisse auf die Verdunstung und die Sickerwasserspende unter verschiedenen Landnutzungen.

Im nachfolgenden Bericht sind die Ergebnisse und Erkenntnisse der Großlysimeteranlage St. Arnold von 1965 bis 2014 dargestellt und beschrieben. Für einen 50-jährigen Zeitraum wird gezeigt, dass die Verdunstungsmengen zunehmen und die Sickerwassermengen abnehmen. Diese Veränderungen sind relevant für aktuelle wasserwirtschaftliche Planungen, z.B. Wasserentnahmen. Gerichtete Veränderungen von Bilanzgliedern des Wasserhaushalts sind auch vor dem Hintergrund des Klimawandels, der im Betrachtungszeitraum anhand der festzustellenden Temperaturveränderung dokumentiert ist, von besonderem Interesse.

In diesem Zusammenhang wurde die in der Lysimeterstation St. Arnold ermittelte „Grundwasserneubildung unter Grünland“ in das Klimafolgenmonitoring des LANUV aufgenommen. Die Lysimeteranlage liefert somit wichtige Daten, um standortbezogene Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt (z.B. die Evapotranspiration, Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung) belastbar festzustellen.

Mein Dank geht an alle Beteiligten, die die Lysimeteranlage mit großem Engagement errichtet, betrieben und erhalten haben. Ein weiterer Dank gilt den Autoren, die die Fülle der Daten aus 50 Jahren kompakt aufbereitet und dargestellt haben.



Dr. Thomas Delschen  
Präsident des Landesamtes für Natur,  
Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlagen und Entwicklung der Lysimetrie.....</b>	<b>10</b>
1.1	Allgemeines .....	10
1.2	Vom Vegetationskasten zum Großlysimeter – ein kurzer historischer Exkurs.....	10
1.3	Bedeutung und Aufgaben der Lysimetrie heute.....	12
1.4	Arten von Lysimetern und Einordnung der Anlage St. Arnold.....	12
1.5	Mit dem Großlysimeter St. Arnold vergleichbare Anlagen .....	13
<b>2</b>	<b>Beschreibung der Großlysimeteranlage St. Arnold.....</b>	<b>15</b>
2.1	Veranlassung und Rahmenbedingungen zum Bau der Großlysimeteranlage St. Arnold .....	15
2.2	Bauliche Charakteristik.....	16
2.3	Messeinrichtungen und Untersuchungsobjekte der Anlage .....	19
2.4	Einrichtungen für die Öffentlichkeitsarbeit .....	28
2.5	Größere historische Veränderungen und besondere Ereignisse an der Anlage.....	29
<b>3</b>	<b>Erkenntnisse aus 50jährigen Zeitreihen .....</b>	<b>32</b>
3.1	Quantitative Messergebnisse .....	32
3.1.1	Meteorologische Messungen.....	32
3.1.1.1	Sonnenscheindauer.....	32
3.1.1.2	Globalstrahlung .....	34
3.1.1.3	Lufttemperatur .....	36
3.1.1.4	Relative Luftfeuchte .....	39
3.1.1.5	Wind .....	41
3.1.1.6	Niederschlag.....	46
3.1.2	Lysimetrische Messungen.....	51
3.1.2.1	Sickerwasserabläufe und Gesamtverdunstung .....	51
3.1.2.2	Baumbestand-Zuwachsmessungen .....	63
3.1.3	Grundwassergang im Bereich der Lysimeteranlage .....	69
3.2	Qualitative Messungen.....	73
3.2.1	Beschaffenheit des Niederschlagswassers .....	73
3.2.2	Beschaffenheit des Sickerwassers .....	74
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse.....</b>	<b>77</b>
<b>5</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>79</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prinzipskizze eines Lysimeters .....	10
Abbildung 2:	Standort der Großlysimeterstation St. Arnold (Kartengrundlage: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2015).....	16
Abbildung 3:	Luftbild der Großlysimeteranlage St. Arnold (Kartengrundlage: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2015).....	17
Abbildung 4:	Modell mit Aufriss der Großlysimeteranlage St. Arnold .....	18
Abbildung 5:	Eingang zum Messkeller (links), Sicherungen im Lysimeterkeller (rechts) .....	18
Abbildung 6:	Messkeller mit Auffangbecken für Sickerwasser (links), Versickerungsschacht (rechts).....	19
Abbildung 7:	Messgeräte-Gesamtansicht (von links nach rechts: Sonnenschreiber, Wetterhütte, Windmast, Pyranometer- Messgerüst, Hellmann-Regenmesser, Thermo-Hygrogeber) .....	20
Abbildung 8:	Regenschreiber (Bodenhöhe) (links), Hellmann-Regen-messer, 1 m Höhe, daneben Lysimeter-Peilrohr (rechts).....	21
Abbildung 9:	Niederschlagsmesser über den Baumkronen (links), Pionierwald und ehemalige Niederschlagsmessung in Kronenhöhe (rechts) .....	22
Abbildung 10:	Auffangwanne für durchtropfenden Niederschlag unter Wald (links), Sammeltonne und Schreibpegel für durchtropfenden Niederschlag unter Wald (rechts).....	22
Abbildung 11:	Gummimanschetten an den Baumstämmen und Sammeltonne mit Schreibpegel für stammablaufenden Niederschlag unter Wald .....	23
Abbildung 12:	Wetterhütte mit Thermohygrograph und Extremthermometer (links), Thermo-Hygrogeber (seit 2006) (rechts) .....	24
Abbildung 13:	Psychrometer nach Frankenberger (1998 bis 2009) (links), Messgerüst mit Pyranometer (seit 1998) (rechts) .....	24
Abbildung 14:	Sonnenschreiber (links), Globalstrahlungsmesser (rechts) .....	25
Abbildung 15:	Windmast, im Hintergrund die Wetterhütte (links), Kontaktanemometer am Windmast (rechts).....	26
Abbildung 16:	Lageplan der Lysimeteranlage mit den Grundwassermessstellen VII/38 LYS.ST.ARND., Nr. 110070380 und VII/50_ST.ARNOLD, Nr. 110070501 (Kartengrundlage: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2015).....	27
Abbildung 17:	Grundwassermessstelle VII/38 LYS.ST.ARND. am Modellhaus (links), Grundwassermessstelle VII/50_ST.ARNOLD am Eingang der Lysimeteranlage (rechts) .....	28
Abbildung 18:	Modellhaus .....	28

Abbildung 19: Lysimeter 3: Sturmschäden (links), zerstörte Auffangrinne (rechts) .....	30
Abbildung 20: Zerstörte Messeinrichtung für Stammablauf (links), Aufräumarbeiten am Lysimeter 3 (rechts) .....	30
Abbildung 21: Jahresgang der monatlichen Sonnenscheindauer im Mittel (links), jährliche Sonnenscheindauer von 1966 bis 2015 (rechts).....	33
Abbildung 22: Tendenzen in der monatlichen Sonnenscheindauer von 1966 bis 2015.....	33
Abbildung 23: Mittlere jährliche Globalstrahlung von 1966 bis 2015.....	34
Abbildung 24: Jahresgang der monatlichen Globalstrahlung im langjährigen Mittel.....	35
Abbildung 25: Jahresgang der monatlichen Lufttemperatur im langjährigen Mittel (links), mittlere jährliche Lufttemperatur von 1966 bis 2015 (rechts) .....	37
Abbildung 26: Tendenzen in der Entwicklung der mittleren monatlichen Lufttemperatur von 1966 bis 2014 .....	38
Abbildung 27: Jahresgang der relativen Luftfeuchte im langjährigen Monatsmittel (links), mittlere jährliche relative Luftfeuchte von 1966 bis 2015 (rechts) .....	40
Abbildung 28: Tendenzen in der Entwicklung der mittleren monatlichen relativen Luftfeuchte von 1966 bis 2015.....	40
Abbildung 29: Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit von 1966 bis 2015.....	41
Abbildung 30: Jahresgang der Windgeschwindigkeit in 3 m, 6 m und 9 m Höhe im langjährigen Monatsmittel .....	43
Abbildung 31: Tagesmittel der Windgeschwindigkeiten in 3, 6, und 9 m Höhe der Zeitreihe von 1966 bis 2015 .....	44
Abbildung 32: Windrichtungssektoren und Häufigkeit der mittleren jährlichen Windrichtung von 1966 bis 2005.....	45
Abbildung 33: Entwicklung der Windrichtungen.....	45
Abbildung 34: Niederschlagsjahressummen von 1965 bis 2015.....	46
Abbildung 35: Verteilung der monatlichen Niederschläge und Extrema im langjährigen Mittel .....	48
Abbildung 36: Tendenzen in den monatlichen Niederschlägen von 1965 bis 2015 .....	48
Abbildung 37: Starkregenereignisse und Häufigkeit .....	50
Abbildung 38: Messergebnisse von Niederschlag und Sickerwasser (N0: Niederschlag in Bodenhöhe gemessen) .....	51
Abbildung 39: Mittlere Monatssummen der Sickerwassermenge (links), Monate ohne Sickerwasser (rechts) .....	55
Abbildung 40: Jährliche Gesamtverdunstung aus Differenz zwischen Niederschlag und Sickerwasser.....	56
Abbildung 41: Entwicklung der jährlichen Verdunstung Grünland.....	57

Abbildung 42:	Entwicklung der jährlichen Verdunstung bei Laubwald (links), Entwicklung der jährlichen Verdunstung bei Nadelwald (rechts) .....	58
Abbildung 43:	Entwicklung der jährlichen Verdunstung bei Pionierwald .....	59
Abbildung 44:	Jahresgang der potenziellen Verdunstung im Monatsmittel der Wasserwirtschaftsjahre von 1998 bis 2015.....	62
Abbildung 45:	Jährliche potenzielle Verdunstung von 1998 bis 2015 .....	63
Abbildung 46:	Entwicklung der Stammzahlen auf den Lysimeterflächen 2 (Eichen-Buchen) und 3 (Weymouthskiefern) .....	64
Abbildung 47:	Entwicklung der Baumhöhen auf den Lysimeterflächen 2 (Eichen-Buchen) und 3 (Weymouthskiefern) .....	64
Abbildung 48:	Entwicklung der Stammdurchmesser der Waldbestände auf den Lysimeterflächen 2 (Eichen-Buchen) und 3 (Weymouthskiefern).....	66
Abbildung 49:	Jährliche Stammzuwächse von Eichen-Buchen und Weymouthskiefern, dargestellt zusammen mit der jährlichen Niederschlagssumme und Lufttemperaturmittel.....	67
Abbildung 50:	Messpunkte zur Bestimmung des Blattflächenindex .....	68
Abbildung 51:	Zeitreihe der Grundwasserstände an der Messstelle VII/38 LYS.ST.ARND. Grundwasserstandsganglinie (blau), Ganglinie der Monatsmittel (grün), Monatsminima (rot) und Monatsmaxima (violett).....	69
Abbildung 52:	Zeitreihe der Grundwasserstände an der Messstelle VII/22 SANKT-A. alt (119906016) und Ersatzmessstelle VII/22 SANKT- ARNOLD (110070227) .....	70
Abbildung 53:	Monatssummen des Niederschlags- und Sickerwassers am Laubwald-Lysimeter sowie Ganglinie der mittleren monatlichen Grundwasserstände an der Messstelle VII/38 LYS.ST.ARND., Nr. 110070380.....	71
Abbildung 54:	Tageswerte des Grundwasserstandes an der Messstelle VII/50_ST.ARNOLD, Nr. 110070501 sowie Tagessummen von Niederschlag und Sickerwasser am Grünland-Lysimeter .....	72

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	50jährige mittlere Monats-, Halbjahres- und Jahressummen der Sonnenschein-Stunden mit statistischen Kennwerten.....	32
Tabelle 2:	50jährige Monats-, Halbjahres- und Jahresmittel der Globalstrahlung in Watt pro m <sup>2</sup> und statistische Kennwerte sowie Energieeinträge (Summen) in kWh/m <sup>2</sup> .....	35
Tabelle 3:	50jährige Monats-, Halbjahres- und Jahresmittel der Lufttemperatur in °C mit statistischen Kennwerten .....	37
Tabelle 4:	50jährige Monats-, Halbjahres- und Jahresmittel der relativen Luftfeuchte in % mit statistischen Kennwerten .....	39
Tabelle 5:	50jährige Monats-, Halbjahres- und Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in m/s in 3, 6 und 9 m Höhe mit statistischen Kennwerten .....	42
Tabelle 6:	Mittlere Häufigkeit in Tagen/Jahr und % der Windrichtung von 1966 bis 2005 .....	44
Tabelle 7:	51jährige mittlere Monats-, Halbjahres- und Jahressummen des Niederschlags mit statistischen Kennwerten.....	47
Tabelle 8:	Vergleich der mittleren Niederschlagssummen in mm am bodengleichen Messgerät und Messgerät in 1 m Höhe der Jahre von 1966 bis 2015 sowie der Unterschied .....	49
Tabelle 9:	Jahresmengen von Niederschlag, Sickerwasser und ihrer Differenzen (N0 - S3(P) entspricht annähernd der Verdunstung).....	53
Tabelle 10:	Mittlere monatliche, halbjährliche und jährliche Sickerwassermengen sowie statistische Kennwerte.....	54
Tabelle 11:	Jahressummen in mm von Freiland-, durchtropfendem, stammablaufendem Niederschlag sowie Interzeption für den Laub- und Nadelwaldbestand .....	60
Tabelle 12:	Mittlere Monats-, Halbjahres- und Jahressummen der potenziellen Verdunstung in mm sowie statistische Kennwerte .....	62
Tabelle 13:	Entwicklung der Baumbestände auf den Lysimeterflächen in St. Arnold .....	65
Tabelle 14:	Messergebnisse des Blattflächenindex.....	68
Tabelle 15:	Statistik der Ergebnisse der Niederschlagswasseranalysen von 2004 bis 2008.....	73
Tabelle 16:	Statistik der Analyseergebnisse der Sickerwasserabläufe von 2005 bis 2007.....	75

# 1 Grundlagen und Entwicklung der Lysimetrie

## 1.1 Allgemeines

Das Wort „Lysimeter“ kann man mit „Durchsickerungsmessgerät“ übersetzen. Die DIN 4049 nennt eine noch etwas weiter gefasste Definition. Es besteht im Prinzip aus einem oben offenen, zu den Seiten und nach unten hin geschlossenen, in seine Umgebung eingelassenen Bodenkörper, aus dem das durchgesickerte Niederschlagswasser erfasst und gemessen wird, bildlich also ein großer in den Boden versenkter Blumentopf mit Sickerwasserablauf. Damit lässt sich aus dem ebenfalls gemessenen Niederschlag sein in Richtung Grundwasser absickernder sowie der verdunstende Anteil und mit entsprechender Vorrichtung auch noch ein auf der Bodenoberfläche seitlich abfließender Anteil bestimmen. So können die Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung, Grundwasserneubildung und auch Oberflächenabfluss ermittelt werden. Aus den Wasseranalysen sind ferner Aussagen zum Stoffumsatz und -transport möglich (Abbildung 1).

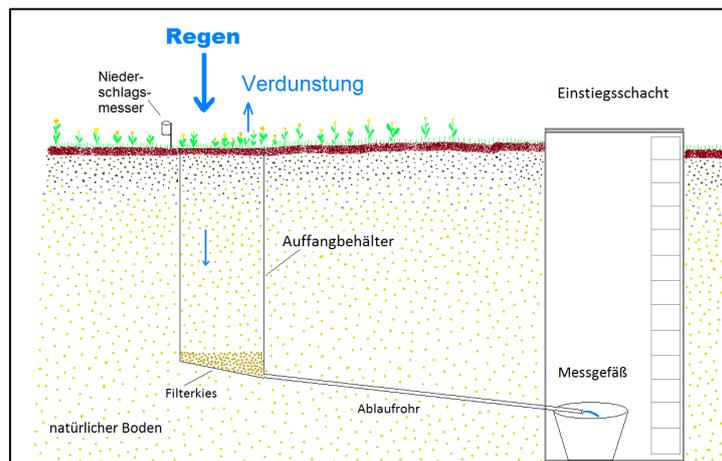


Abbildung 1: Prinzipskizze eines Lysimeters

## 1.2 Vom Vegetationskasten zum Großlysimeter – ein kurzer historischer Exkurs

Der Begriff „Lysimeter“ existierte nicht von Anfang an. So fand sich beispielsweise die Bezeichnung „Vegetationskasten“ (VON SEELHORST 1902) oder „unterirdischer Regenmesser“ (VON LIEBIG 1865).

Den ersten Lysimeter-Versuch erwähnen SALISBURY & ROSS (1969), der bereits vor fast 400 Jahren in den Niederlanden vom Arzt und Naturforscher Johan Babtista van Helmont durchgeführt wurde, um den notwendigen Wasserverbrauch der Pflanzen für ihr Wachstum zu demonstrieren. Bei anderen Autoren gilt der französische Mathematiker und Astronom Philippe de La Hire als erster Lysimeter-Konstrukteur. Er begann 1688 mit seinen Lysimeter-Versuchen der Frage nachzugehen, ob der Abfluss der Quellen und Flüsse allein aus Niederschlägen stammt. Aus seinen 15 Jahre später veröffentlichten Ergebnissen schloss DE LA

HIRE (1703), dass die Niederschläge zu gering seien, um die beobachteten Abflussmengen zu erklären, was häufig umstritten war. Nach etwa 100 Jahren gelang es John Dalton mit den Beobachtungen an seinem 1796 gebauten Lysimeter in Manchester die Wasserhaushaltsgrößen plausibel zu bilanzieren und damit die Speisung von Quellen und Flüssen allein den Niederschlägen zuzuschreiben (DALTON 1802).

Mitte des 19. Jahrhunderts gewann die Frage nach der Bodenfruchtbarkeit an Bedeutung. In diesem Zusammenhang stieg das Interesse, die Sickerwässer chemisch zu untersuchen. Dafür erwiesen sich Lysimeter als geeignete Apparatur, da sie leicht mit verschiedenen Böden bestückt werden konnten. Besonders in England (WAY 1850) und Deutschland (VON LIEBIG 1865, FRAAS & ZOLLER 1859) wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt.

Die bisherigen Lysimeter bestanden immer aus Behältern mit eingefülltem Boden. Daher war die Brauchbarkeit der Messergebnisse häufig strittig. Um möglichst natürliche Verhältnisse nachzuahmen, konstruierte John LAWES 1870 in Rothamsted bei London die ersten Lysimeter mit ungestörter Bodenstruktur (LAWES & GILBERT & WARINGTON 1881). Solch ein monolithisches Lysimeter wurde in den USA erstmalig 1875 bei South Framingham/Massachusetts eingerichtet (STURTEVANT 1882, HAUSHOFER 1962), das bereits eine Fläche von 20 m<sup>2</sup> aufwies. Weitere Monolith-Lysimeter folgten, darunter eines 1888 in Columbia/Missouri (SANBORN 1889) mit einer Fläche von 40 m<sup>2</sup>. Auffangflächen dieser Größen sind bemerkenswert, da sie damals schon einen Übergang zu Großlysimetern einleiteten. Sie wurden aber erst ab den 1940er Jahren realisiert. Bis dahin schritt die Entwicklung und Verbreitung der Lysimeter voran. So begann 1902 Conrad von Seelhorst in Göttingen das erste wägbare Lysimeter zu konstruieren (VON SEELHORST 1902), das einen Monolithblock aufnehmen konnte. Kurz zuvor hatte Ebermayer mit seiner Konstruktion des Trichterlysimeters eine Störung der Bodenstruktur umgehen und erfolgreiche Versuche sogar unter Wald durchführen können. Auch in Nordrhein-Westfalen wurde es eingesetzt (s.a. weiter unten). Unter dem Namen „Ebermayer-Lysimeter“ fand es bald eine beachtliche Verbreitung, darunter in den USA, der ehem. Sowjetunion und Afrika.

Eine detaillierte Zusammenstellung über die geschichtliche Entwicklung der Lysimeter bis zum zweiten Weltkrieg liefern KOHNKE & DREIBELBIS & DAVIDSON (1940).

Dienten die Lysimeter anfangs mehr der groben Bestimmung quantitativer Größen des Wasserhaushaltes, so verlagerte sich mit dem ausgehenden 19. Jahrhundert der Schwerpunkt auf agrikulturchemische Fragen und die damit zusammenhängenden Inhaltsstoffe im Sickerwasser. Unter diesem Aspekt leitet sich aus dem griechischen Wort für „Lösung“ und „Messen“ der Begriff „Lysimeter“ ab. Diese wurden dann Mitte des 20. Jahrhunderts wieder stärker für die Messung der aktuellen Verdunstung und Grundwasserneubildung herangezogen, als darüber genauere Werte wegen des höheren Wasserbedarfs im Zuge der wachsenden Industrialisierung und der knapper werdenden Wasservorräte benötigt wurden. In den letzten Jahren werden Lysimeter wieder verstärkt für Untersuchungen von Stoffumsätzen im Zusammenhang mit der größeren Bedeutung des Umweltschutzes benötigt. Ein Beispiel dafür ist die Lysimeteranlage Waldfeucht bei Mönchengladbach, die vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen betrieben wird.

Eine Zusammenstellung von Lysimeterstationen in Deutschland lieferte KRETZSCHMAR (1999) nach einer Fragebogenaktion. Einen Überblick über die Lysimeter in Europa bieten die Website [www.lysimeter.at](http://www.lysimeter.at) und der Aufsatz von LANTHALER (2006). Danach wurden in 20 europäischen Ländern an rd. 230 Messplätzen ca. 2.500 Lysimeter ermittelt, wovon etwa die Hälfte in Deutschland platziert ist. In Eberswalde (Nordbrandenburg) befindet sich das wohl weltweit älteste noch betriebene Lysimeter aus dem Jahr 1927.

### **1.3 Bedeutung und Aufgaben der Lysimetrie heute**

Die mit einem Lysimeter bestimmten Wasserhaushaltsgrößen und Inhaltsstoffe des Wassers gelten zunächst nur für den Bodenkörper des Lysimeters. Er kann durch den Einbau stark gestört sein, so dass anfangs nicht repräsentative Messergebnisse auftreten können. Ziel jedoch ist, weitgehend allgemeingültige und übertragbare Messwerte zu gewinnen. Die zunehmende Anzahl von Lysimetern mit verschiedenen Arten von Bodenkörpern und Vegetation in klimatisch unterschiedlichen Regionen hat aber gezeigt, dass die Messergebnisse meist zu plausiblen Aussagen führten, die sich in der Realität bestätigt haben. So ist die Lysimetrie eine sichere Methode, gerade wenn spezielle Fragen zum Einfluss von Boden und Bewuchs auf den Wasser- und Stoffhaushalt und dessen zeitlichen Verlauf zu klären sind. Ebenso findet sie in der landwirtschaftlichen Forschung über Pflanzenzüchtung, Wasserverbrauch, Düngung, Stoffaustrag, Landnutzungsformen und bei der Entwicklung agrartechnischer Methoden eine breite Anwendung, wie auch bei Untersuchungen zu Deponiedichtungen und -substraten, Schadstoffverhalten, Altlasten, Sickerwasserreduzierung, Rekultivierung und Niederschlagswasserbeseitigung, Schneeabbauraten und Gewinnung von Schneeproben sowie bei Computersimulationen, Kalibrierung und der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen.

### **1.4 Arten von Lysimetern und Einordnung der Anlage St. Arnold**

Abhängig von den Untersuchungszielen wurden verschiedene Lysimetertypen entwickelt. Genaue Ausführungen darüber sind in DVWK / FH-DGG Fachausschuß Grundwassererkundung (1980) zu finden. Ein häufig gebauter und in Deutschland eine Art Standardtyp ist das Lysimeter nach Friedrich-Franzen mit einem Durchmesser von 1,13 m bzw. einer Auffangfläche von 1 m<sup>2</sup> und einer Tiefe von 1,5 bis 3 m. Eine Variante stellen Unterdrucklysimeter dar, um Funktionsstörungen durch Sickerwasserstau und Kapillareffekt an der Lysimetersohle zu umgehen. Sind die Auswirkungen des Grundwassers auf den Bodenwasserhaushalt von Interesse, können Grundwasserlysimeter, also solche mit konstant oder variabel einstellbarem Grundwasserstand eingesetzt werden. Wenn kurzfristige Verdunstungsbeträge, z.B. Tageswerte erhoben werden sollen, stehen wägbare Lysimeter mit und ohne Grundwasser oder Unterdruck zur Verfügung.

Kleinst- und Kleinlysimeter haben einen Durchmesser von meist 10 bis 100 cm und werden überwiegend bei Fragen zum Stofftransport eingesetzt.

Ein weiteres Typisierungskriterium für die genannten Lysimeter ist die Einbringung des Bodenkörpers, entweder monolithisch, d.h. ungestört oder gestört, also eingefüllt und für alle Lysimetertypen auch Bodenart, -schichtung und Bewuchs.

Für Untersuchungen des Wasserhaushalts bei großwüchsiger Vegetation, insbesondere Wald, müssen größere Lysimeter zum Einsatz kommen. Weisen sie eine Auffangfläche von mehr als 100 m<sup>2</sup> vor, werden sie üblicherweise als Großlysimeter bezeichnet. Sie sind i.d.R. nicht wägbar und nicht monolithisch. Aufgrund ihrer hohen Baukosten gibt es nur wenig Großlysimeter. Eines davon befindet sich in St. Arnold bei Rheine im nördlichen Münsterland. Über dieses etwas mehr als 50 Jahre bestehende Lysimeter und seine Messergebnisse wird im Weiteren näher berichtet.

Ziel war, ohne störende Randeffekte und hohe Baukosten ausreichend genau das Sickerwasser unter Hochwald mit einem Unterflurlysimeter erfassen zu können. Es besteht im Wesentlichen aus einem unterirdisch, von einem vorgetriebenen Stollen aus eingebauten Trichter mit einer Auffangfläche von 1 m<sup>2</sup>. Daher wurde im Jahre 1956 ein sogenanntes Trichterlysimeter in Hamm-Bossendorf (Stadt Haltern) eingerichtet. Es hat sich aber gezeigt, dass dort unkontrollierte Zu- und Abflüsse häufig zu nicht repräsentativen Messergebnissen führten (SCHROEDER 1969 a, b).

Die meisten der bestehenden Großlysimeter wurden für Untersuchungen an Dichtungen für Deponien, Halden oder Altlasten eingerichtet. Großlysimeter mit Waldbestand sind nur wenige bekannt, die anschließend kurz beschrieben werden.

## **1.5 Mit dem Großlysimeter St. Arnold vergleichbare Anlagen**

Außer der Großlysimeteranlage St. Arnold existieren mit Waldbebestockung die Großlysimeter von Britz bei Eberswalde bzw. Berlin. Hierbei handelt es sich um neun kastenförmige Lysimeter mit je 100 m<sup>2</sup> Fläche und 5 m Tiefe, die 1972 gebaut wurden. Seit der Bepflanzung im Jahr 1974 werden an Buchen, Lärchen, Douglasien (je zwei Lysimeter) und Kiefern (drei Lysimeter) auf mittel- bis feinkörnigem Sandboden forsthydrologische Untersuchungen bezüglich Wasserhaushaltsgrößen, Wasserverbrauch, Wachstum und Holzproduktion mit Blick auf den Klimawandel durchgeführt. Im Rahmen des Waldumbaus in Brandenburg wurden für die wissenschaftliche Begleitung im Jahr 2000 die Lysimeterbestände der Lärchen mit Buchen und der Kiefern mit Buchen und Eichen unterbaut, letztere auch neu angepflanzt. Ergänzende Untersuchungen, insbesondere hinsichtlich Aufwuchs, Bodenvegetation und Grundwasser erfolgen durch mehrere, z.T. wägbare Kleinlysimeter in Britz und in Eberswalde (MÜLLER 2011). Der durchschnittliche Jahresniederschlag beträgt nur ca. 550 mm. Die Anlage wird vom Institut für Waldökosysteme des Johann Heinrich von Thünen-Instituts betrieben.

Das Großlysimeter Colbitz-Letzlinger Heide in Colbitz bei Magdeburg wird seit 1972 betrieben und besteht aus einem mit z.T. kiesigem Sand lageweise aufgefüllten 4 m tiefen Zylinder aus Spannbeton. Die 650 m<sup>2</sup> große Fläche wurde 1973 mit Kiefern bestockt (GLUGLA &

FISCHER & HÖHNE & KORTÜM & HELBIG 1982). Es existieren Messdaten von Tensiometern (Messgerät für Bodenfeuchte) und Saugkerzen (Gerät zur Gewinnung von Bodenwasserproben) sowie von Bestand- und Freilandniederschlag, Stamm- und Sickerwasserabläufen, Wasseranalysen, Holzqualität und Ertragszuwächsen. Mit rd. 560 mm liegt der mittlere Jahresniederschlag ebenfalls weit unter dem von St. Arnold. Die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW FVA) in Göttigen betreibt die Messanlage (SUTMÖLLER 2014).

Unabhängig davon wird vom Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft (LHW) die wägbare Lysimeterstation Colbitz betrieben, bei der an den 12 Lysimetern (1 m<sup>2</sup>) seit 1968 die Wasserhaushaltsgrößen der Heide- und Offenlandvegetation sowie seit 1992 die Sickerwasserqualität gemessen werden und seit 1998 atmosphärische Depositionen durch das Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU) (HAGENAU 2014).

In Nordholland wurde in den Jahren 1938 bis 1940 eine Großlysimeteranlage in Castricum gebaut. Es handelt sich um vier 625 m<sup>2</sup> große und 2,5 m tiefe mit Sand gefüllte quadratische Behälter aus Beton mit konstant eingestelltem Grundwasserspiegel in 2,25 m Tiefe (UHLIG 1956). Neben einem vegetationsfreien Behälter wurden sie jeweils mit Laubgehölz (Eichen, Erlen, Birken), Schwarzkiefern und Dünengras bepflanzt. Die Station, die von 1941 bis 2001 in Betrieb war, lieferte Daten für die Überprüfung von Verdunstungsformeln und die Erstellung von Bilanzmodellen. Die durchschnittliche Niederschlagshöhe liegt dort bei etwa 850 mm/Jahr (VAN DER HOEVEN 2011). Die Messdaten sind über das Internet unter der im Literaturverzeichnis angegebenen Adresse abrufbar. Betrieben wurde die Anlage vom Provinciaal Waterleidingbedrijf Noord-Holland (PWN) in Zusammenarbeit mit dem Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI).

Weltweit gesehen ist von den Großlysimetern mit Waldvegetation noch die historische Station im San Dimas Versuchsforst in Süd-Californien zu nennen. Sie befindet sich etwa 50 km nordöstlich von Los Angeles und wurde 1937 fertiggestellt. Die rechteckige Fläche des Großlysimeters beträgt insgesamt etwa 532 m<sup>2</sup>. Es ist durch Betonwände aufgeteilt in 26 Einzel-Lysimeter mit einer Auffangfläche von jeweils ca. 20,48 m<sup>2</sup> und einer Tiefe von 1,83 m. Von diesen mit ortstypisch sandigem Lehm aufgefüllten Lysimeter blieb eines vegetationslos, fünf trugen niedrige Vegetation, Gras (zwei Lysimeter) und Wilden Buchweizen (drei). Zehn Lysimeter waren mit Buschwerk bepflanzt (fünf mit Scheinseide, drei mit Kalifornischem Flieder, zwei mit Zuckerbusch). Auf jeweils fünf Lysimeter standen Kalifornische Buscheichen und Coulter-Kiefer (SINCLAIR & PATRIC 1959). Für Vergleichszwecke unter mehr natürlichen Bedingungen und ausschließlich Tensiometer-Messungen wurden noch fünf Lysimeter (10,17 m<sup>2</sup>) ohne Wandung sowie für eine direkte Messung von Evaporation und Transpiration mittels regelmäßiger Wägung durch einen fahrbaren Mastkran 30 Kleinlysimeter (0,48 m<sup>2</sup>) mit und 72 Lysimeter (0,16 m<sup>2</sup>) ohne Sickerwasserablauf installiert. Dazu kamen fünf speziell konstruierte Lysimeter (2,23 m<sup>2</sup>) für Wurzelstudien. Die Baumbestände wurden durch einen Waldbrand im Jahr 1960 vernichtet, womit dort auch die Messungen endeten. Sie konzentrierten sich danach auf krautige Vegetation. In den 80er Jahren wurden Untersuchungen zur Bodenveränderung hinsichtlich stofflicher Belastung und Genese durchgeführt. Der Versuchsforst mit der Lysimeterstation wird vom Forest Service Research & Development (FS R&D) betrieben. Er weist ein mediterranes Klima mit durchschnittlich 700 mm jährlichem Niederschlag und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 14,4 °C auf.

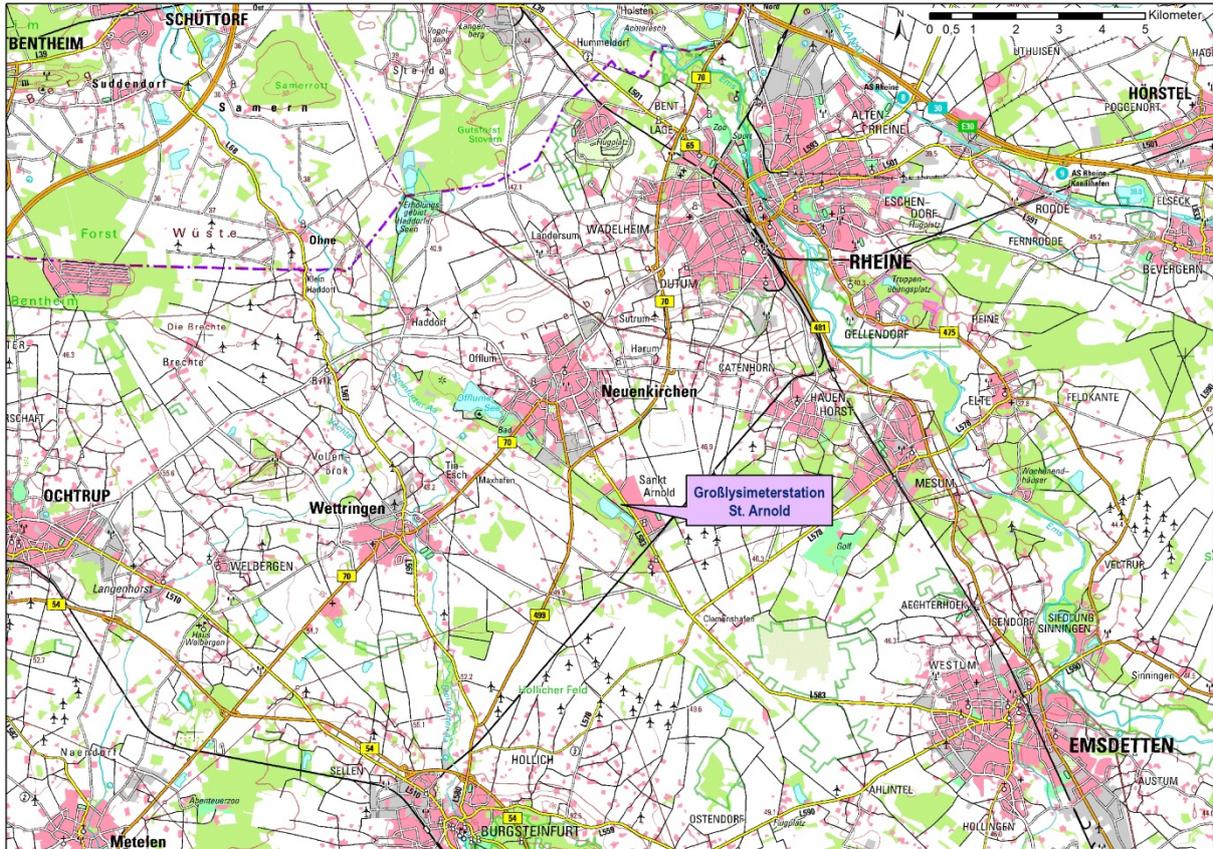
## **2 Beschreibung der Großlysimeteranlage St. Arnold**

### **2.1 Veranlassung und Rahmenbedingungen zum Bau der Großlysimeteranlage St. Arnold**

Als nach dem zweiten Weltkrieg der Wiederaufbau einsetzte und mit dem wirtschaftlichen Aufschwung auch die Bauwirtschaft wuchs, stieg insbesondere in den 1960er Jahren ihr Bedarf an Rohstoffen wie Sand und Kies stark an. Dieser war bevorzugt in quartären Rinnen, wie dem Münsterländer Hauptkiessandzug zu finden. Sie führten zugleich auch große Vorräte an nutzbarem Grundwasser für die Wasserwerke zur Versorgung der Bevölkerung und Industrie. Einhergehend mit deren Wachstum erhöhte sich auch der Bedarf an Trink- und Brauchwasser (s.a. BATTELLE-INSTITUT e.V. 1972), so dass konkurrierende Nutzungsansprüche zwischen der Steine- und Erdenindustrie und der Grundwassergewinnung entstanden. Durch die Sand- und Kiesgewinnung wurden Baggerseen geschaffen, die zu einer erhöhten Verdunstung des Grundwassers beitrugen aber auch zur Verminderung seines Schutzes infolge der abgetragenen Deckschichten und anderweitiger Nutzung dieser Seen durch Baden und Wassersport. Zur Beurteilung und ggf. Anpassung der Genehmigungen für die Sand- und Kiesgewinnung durch die Behörden bedurfte es an Nachweisen des Grundwasserverlustes durch Mehrverdunstung. Dazu waren möglichst direkt gemessene und übertragbare Zahlenwerte sowohl für die See- als auch für die Land-Verdunstung unter einer für diese Gegend repräsentativen Vegetation, insbesondere Wald notwendig, ebenso für die Grundwasserneubildung. Daher wurde von dem damaligen Wasserwirtschaftsamt Münster im Jahr 1966 eine Verdunstungsmessanlage mit Wetterstation am Halterner Stausee geplant und 1967 in Betrieb genommen (s.a. WERNER & SWETER & BRAUN 1976; FLENDER 1999). Sie ist inzwischen wieder abgebaut. Messungen erfolgten bis 1986. Die insbesondere für Waldbestand weitgehend unstrittigen Messwerte für Verdunstung und Grundwasserneubildung ließen sich am besten durch ein Lysimeter mit einer großen Auffangfläche gewinnen. Die vielfach verwendeten Friedrich-Franzen-Lysimeter mit einer Auffangfläche von nur 1 m<sup>2</sup> erwiesen sich in dieser Situation als nicht genügend aussagefähig wie auch die Trichterlysimeter in Hamm-Bossendorf aus konstruktiven Gründen (SCHROEDER 1969 a, b, 1970, 1983), und das Großlysimeter in Castricum konnte nicht für den Münsterländer Kiessandzug und das Umfeld wegen abweichender Grundwasserstands- und klimatischer Verhältnisse als ausreichend repräsentativ gelten. So entstand der Plan für die Großlysimeteranlage St. Arnold, der in den Jahren 1962 bis 1964 verwirklicht wurde. Am 1. November 1964 nahm die Anlage ihren Messbetrieb auf (zunächst nur Niederschlag). Vorgesehen war eine Betriebszeit von 50 Jahren.

Die Lysimeteranlage liegt in St. Arnold, einem Ortsteil der Gemeinde Neuenkirchen (Kreis Steinfurt) und im Einzugsgebiet des Wambaches, einem linksseitigen Nebengewässer der Ems auf einer topografischen Höhe von rd. 52 m NHN, nur ca. 150 m von der Wasserscheide der Ems/Ijsselmeer-Zuflüsse entfernt (Abbildung 2). Naturräumlich gehört das Gebiet zum Hollicher Feld im Westmünsterland. Geologisch gesehen befindet sich die Anlage im Bereich des meist 1 km breiten und bis zu 40 m mächtigen Münsterländer Kiessandzuges, der sich als eine saalekaltzeitliche Schmelzwasserablagerung (THIERMANN 1973) auf einer Länge von ca. 85 km von Sendenhorst bis in die niedersächsische Bauernschaft Ahlde, nördlich von Neuenkirchen erstreckt und eine in den Kreide-Mergel eingetiefte Rinne ausfüllt. Er bildet in

diesem Bereich das erste bzw. oberste Grundwasserstockwerk. Es herrscht ein gemäßigtes Klima bei einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagshöhe von rd. 790 mm.



**Abbildung 2:** Standort der Großlysimeterstation St. Arnold (Kartengrundlage: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2015)

## 2.2 Bauliche Charakteristik

Ausführlich wird die Großlysimeteranlage von PRENK & FLENDER (1965), FLENDER (1999) sowie SCHROEDER (1975) beschrieben. Daher genügt hier eine Zusammenfassung. Die Abbildung 4 mit einem Teilaufriß gibt einen Überblick über den Aufbau der Lysimeteranlage.

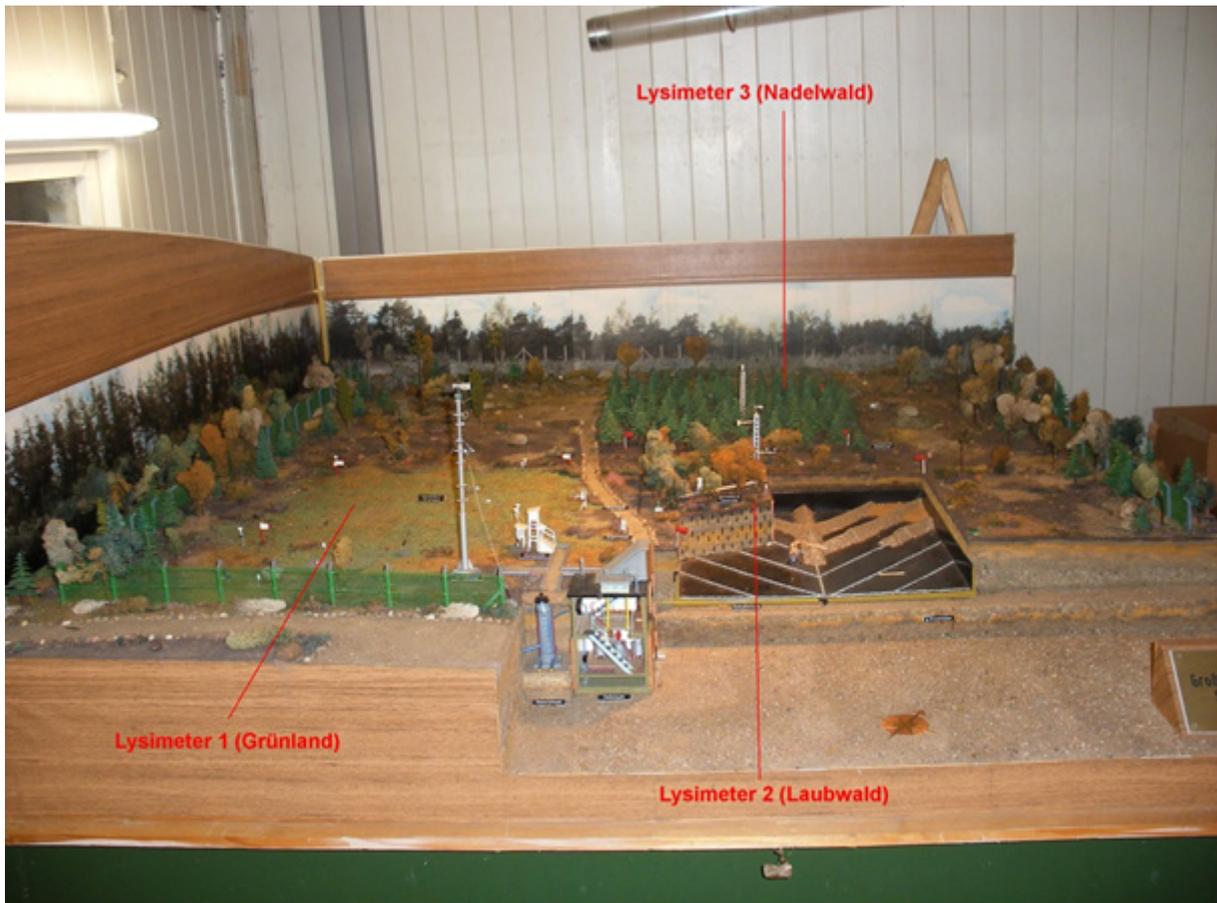
Die Anlage besteht aus drei quadratischen Becken mit einer Auffangfläche von je 400 m<sup>2</sup> und 3,5 m mittlerer Tiefe. Die Seitenwände sind als Winkelstützmauern gebaut und mit Spundwänden bis zur Bodenhöhe erweitert. Über dem Dränsystem an der Beckenbasis (s. Aufriss der Abbildung 4) ist Material des Kiessandzuges mit zuoberst Heide-Podsol Bodenschichtgetreu aufgefüllt. Ein Lysimeter trägt kurzgehaltene Grasvegetation (Lysimeter 1).

Das zweite Becken ist mit Eichen-Buchenbestand bestückt (Lysimeter 2) und das Dritte mit Weymouthskiefern bzw. Stroben bis Januar 2007, später nach Sturmschäden mit Pionierwald (Lysimeter 3).

Die Ansicht der Abbildung 4 in Richtung Nordwest vermittelt einen Eindruck über das Gelände der Lysimeterstation. Deutlich sichtbar ist die quadratische Fläche des Gras-Lysimeters links vorne, absteckt durch vier Markierungspfosten mit weißen Richtungsweisern, rechts vorne ein Teilaufriss des Laubwald-Lysimeters mit den Eichen/Buchen, dessen Fläche durch rote Markierungen gekennzeichnet ist und hinten rechts das ehemalige Nadelwald-Lysimeter mit den Weymouthskiefern. Ebenfalls gut zu erkennen sind einige der Messeinrichtungen, wie der Windmast und die Wetterhütte (s. Kapitel 2.3) unmittelbar vor dem Gras-Lysimeter. Ganz im Vordergrund der Abbildung ist der Eingang zum Lysimeterkeller bzw. Messschacht zu sehen. Von der Drainage, ebenfalls im Aufriss der Abbildung 4 erkennbar, wird durch Kunststoffrohre das Sickerwasser zu einem Messschacht geführt, in drei getrennten Messbehälter von je 400 l Inhalt gesammelt (s. Abbildung 6, links) und durch eine von FLENDER erdachte Vorrichtung gemessen, registriert und über einen Pumpensumpf mittels Pumpe zu einem außerhalb befindlichen Sickerschacht (Abbildung 6, rechts, in Abbildung 4 links von der Treppe zum Messschacht) und fünf horizontale Filterrohre dem Untergrund zugeführt.



**Abbildung 3:** Luftbild der Großlysimeteranlage St. Arnold (Kartengrundlage: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2015)



**Abbildung 4:** Modell mit Aufriss der Großlysimeteranlage St. Arnold



**Abbildung 5:** Eingang zum Messkeller (links), Sicherungen im Lysimeterkeller (rechts)

## 2.3 Messeinrichtungen und Untersuchungsobjekte der Anlage

Neben den Messeinrichtungen für lysimetrische Messungen, wie die des Sickerwassers, Baumzuwachsmessungen (Stammdurchmesser und Baumhöhen) ist die Anlage mit Geräten für meteorologische Messungen ausgestattet. Die damit gemessenen Parameter werden insbesondere für die Berechnung der wichtigen Wasserhaushaltsgröße Verdunstung benötigt.

### Sickerwasser

Das von der jeweiligen Dränage der drei Lysimeterbecken aufgenommene und zum Messkeller geleitete Sickerwasser wird dort in den entsprechenden zum Lysimeter gehörigen Auffangbecken (Abbildung 6, links) gesammelt und der Wasserstand im Behälter analog mittels Pegelschreiber aufgezeichnet, so dass Summenkurven der Sickerwasserabläufe vorliegen. Aus ihnen werden die Tageswerte ermittelt.

Sind die 400 l fassenden Becken gefüllt, werden sie durch einen speziellen Hebermechanismus entleert. Das Wasser wird über einen Versickerungsschacht entsorgt (Abbildung 6, rechts).



**Abbildung 6:** Messkeller mit Auffangbecken für Sickerwasser (links), Versickerungsschacht (rechts)

Zur Funktionskontrolle des Dränsystems wird freies Stauwasser an der tiefsten Lysimeterbasis mit einem Peilrohr (Abbildung 8, rechts) an allen drei Lysimetern bedarfsweise gemessen.

### Baumhöhe

Zeitgleich werden auch die Baumhöhen gemessen. Die Messungen erfolgten bis zu ca. 6 m Baumhöhe direkt mit einer Messlatte, danach mit einem Baumhöhenmessgerät (Winkelmeßgerät) trigonometrisch.

### Stammdurchmesser

Die Baumstammdurchmesser werden mittels meist fest installierten Pi-geteilten Messbändern bestimmt, was praktisch auf eine Messung des Stammumfanges hinausläuft.

### Stammzahl

Die Anzahl der lebenden Baumstämme wird nach Ende eines jeden Abflussjahres, meist im Dezember/Januar auf der Lysimeterfläche 2 festgestellt (auf 3 bis zum Jahr 2006). Eine Verminderung der Stammzahlen im Vergleich zum Vorjahr geht beim Eichen-Buchenbestand auf das Aussterben schwacher Bäume zurück, bei den Weymouthskiefern auf Hiebmaßnahmen bis im Januar 2007 die Entwurzelung durch den Sturm Kyrill erfolgte.



**Abbildung 7:** Messgeräte-Gesamtansicht (von links nach rechts: Sonnenschreiber, Wetterhütte, Windmast, Pyranometer-Messgerüst, Hellmann-Regenmesser, Thermo-Hygrogeber)

### Niederschlag

Innerhalb der Lysimetrie ist der Niederschlag eine wichtige Wasserhaushaltsgröße. Von ihm hängt u.a. ab, wie viel Sickerwasser anfällt bzw. wie hoch die Grundwasserneubildung ist.

Die Registrierung der Niederschlagshöhe erfolgt in mm. Der Niederschlag wird an mehreren Messgeräten unter verschiedenen Bedingungen gemessen:

### Niederschlag in Bodenhöhe

Mit der Aufzeichnung der Niederschläge in Bodengleiche auf 53 m NHN (Abbildung 8, links) sollen windbedingte Messfehler quantifiziert werden. Im Vergleich zum standardmäßig aufgestellten Niederschlagsmesser in 1 m Höhe (Abbildung 8, rechts) wurde früher am Boden ein um fast 3 % höherer Niederschlag gemessen (s.a. Kapitel 3.1.1.6).

Der Niederschlagsschreiber (Pluvio) liefert den zeitlichen Verlauf der Niederschlagsereignisse und befindet sich in einer Messgrube (Abbildung 8, links).



**Abbildung 8:** Regenschreiber (Bodenhöhe) (links), Hellmann-Regenmesser, 1 m Höhe, daneben Lysimeter-Peilrohr (rechts)

### Niederschlag in 0,4 m Höhe

Die Messungen in 0,4 m Höhe erfolgten im Zusammenhang mit Messungen am Class-A-Kessel der Landverdunstung und sind wie diese seit 1990 eingestellt (siehe Seite 26).

### Niederschlag in 1 m Höhe

Der Hellmann-Regenmesser (Abbildung 8, rechts) ist in der Nähe des Regenschreibers aufgestellt. Abgelesen wird täglich um 7:30 Uhr.

Die Messungen an einem weiteren Gerät, das sich an einem stark geschützten Standort am Rande des Weymouthskiefernbestandes befand, wurden eingestellt, um den personellen Aufwand zu reduzieren und weil die Messwerte aus dem Schreiber und dem daneben stehenden Gerät ausreichen.

### Niederschlag in Baumkronenhöhe

Die Niederschlagsmessungen nach Hellmann über den Baumkronen der beiden Waldbestände wurden ebenfalls 1990 wegen des hohen Wartungsaufwands (Verunreinigung durch Vögel) eingestellt. Die Ablesungen erfolgten täglich. Die Abbildung 9 (links und rechts) zeigen die Maste mit den Niederschlagsmessern in Kronenhöhe.



**Abbildung 9:** Niederschlagsmesser über den Baumkronen (links), Pionierwald und ehemalige Niederschlagsmessung in Kronenhöhe (rechts)

### Durchtropfender Niederschlag

Zurzeit wird der durchtropfende Niederschlag nur im Laubwaldbestand mit einer Durchtropfwanne (Abbildung 10, links) von 15,70 x 0,16 m und 2,512 m<sup>2</sup> Auffangfläche erfasst, zur Sammeltonne (Abbildung 10, rechts) geleitet und mittels Schreibpegel kontinuierlich aufgezeichnet.



**Abbildung 10:** Auffangwanne für durchtropfenden Niederschlag unter Wald (links), Sammeltonne und Schreibpegel für durchtropfenden Niederschlag unter Wald (rechts)

Im ehemaligen Kiefernbestand, jetzt Pionierwald, wurden infolge der Schäden durch den Sturm Kyrill im Januar 2007 die Messungen eingestellt und bisher nicht wieder aufgenommen.

Der durchtropfende Niederschlag macht den größten Teil des Bestandsniederschlags aus.

#### Stammablaufender Niederschlag

Der Stammablauf wird durch rinnenförmige Gummimanschetten (Abbildung 11) von je einer Gruppe von 10 Bäumen abgefangen, der Sammeltonne zugeführt und mit dem Schreibpegel registriert. Die Ablaufmenge wird auf die von der Baumgruppe abgeschirmte Bodenfläche bezogen (im Jahr 1980 zum Beispiel 20 m<sup>2</sup>). Der Stammablauf ist ebenfalls ein Teil des Bestandsniederschlags. Messungen im ehemaligen Kiefernbestand erfolgen seit Januar 2007 wegen der schon erwähnten Sturmschäden nicht.



**Abbildung 11:** Gummimanschetten an den Baumstämmen und Sammeltonne mit Schreibpegel für stammablaufenden Niederschlag unter Wald

Die Interzeption, sie ist der von den Pflanzen zurückgehaltene Niederschlag, ergibt sich aus der Differenz zwischen Freilandniederschlag und Bestandsniederschlag (durch Baumkronen tropfender plus stammablaufender Niederschlag).

#### **Lufttemperatur**

Die Temperatur der Luft wird in Grad Celsius [°C] mit einem Thermografen in 2 m Höhe standardmäßig in der Wetterhütte (Abbildung 12, links) kontinuierlich aufgezeichnet. Dort wird auch an zwei geeichten Extremthermometern täglich morgens um 7:30 Uhr das Minimum und Maximum der Lufttemperatur der letzten 24 Stunden abgelesen (redundante Aufzeichnungen). Seit 2006 erfolgt die Lufttemperaturmessung primär auch am Thermo-Hydrogeber (Abbildung 12, rechts).



**Abbildung 12:** Wetterhütte mit Thermohygrograph und Extremthermometer (links), Thermo-Hygrogeber (seit 2006) (rechts)

### Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte, das Verhältnis vom herrschenden Dampfdruck zum maximalen Dampfdruck (Sättigungsdampfdruck) bei gegebener Lufttemperatur in %, wird ebenfalls in 2 m Höhe in der Wetterhütte mit einem Psychrometer-Schreiber gemessen, der in unregelmäßigen Abständen durch ein Aspirationspsychrometer nach Aßmann geeicht wird. Die primären Messwerte jedoch liefert der Thermo-Hygrogeber (Abbildung 12, rechts) seit 2006.



**Abbildung 13:** Psychrometer nach Frankenberger (1998 bis 2009) (links), Messgerüst mit Pyranometer (seit 1998) (rechts)

### **Sonnenscheindauer**

Die Sonnenscheindauer wird in Stunden pro Tag in 2 m Höhe mit dem Sonnenschein-Schreiber nach Campbell-Stokes seit Messbeginn der Lysimeteranlage täglich festgestellt (Abbildung 14, links).



**Abbildung 14:** Sonnenschreiber (links), Globalstrahlungsmesser (rechts)

### **Globalstrahlung**

Bei der Globalstrahlung handelt es sich um den kurzwelligen Teil der Himmelsstrahlung. Sie wurde in  $\text{Joule}/\text{cm}^2/\text{min}$  mit dem Analog-Strahlungsschreiber nach Robitzsch und wird seit November 1997 mit dem Globalstrahlungsmesser bzw. Pyranometer (Abbildung 13, rechts, Abbildung 14, rechts, Abbildung 15, links) in  $\text{Watt}/\text{m}^2$  gemessen.

### **Windgeschwindigkeit (Windweg)**

Die Windgeschwindigkeit wird in  $\text{m}/\text{s}$  in 3 m, 6 m und 9 m Höhe mit drei Kontaktanemometern (Abbildung 15, rechts) an einem Mast (Abbildung 15, links) analog registriert.

Die Messungen in 0,4 m Höhe im Zusammenhang mit der Class-A-Kesselverdunstung sind wie diese seit 1990 eingestellt (siehe auch Seite 26). Daneben werden die Messwerte auch an den Zählwerken angezeigt, wo täglich um 7:30 Uhr die Ablesung erfolgt.



**Abbildung 15:** Windmast, im Hintergrund die Wetterhütte (links), Kontaktanemometer am Windmast (rechts)

### **Windrichtung**

Die Messung der Windrichtung erfolgte analog in 10 m Höhe am Windmast mit einem Windrichtungsgeber (Abbildung 15, links) bis zum Jahre 2009. Nach einem Schaden am Gerät sind die Messungen zunächst nicht wieder aufgenommen worden, weil sie wegen der starken Verwirbelung in dieser Höhe als nicht mehr repräsentativ angesehen wurden. Im Jahr 2016 wurden aber nach Installation neuer Windrichtungsgeber die Messungen wieder aufgenommen.

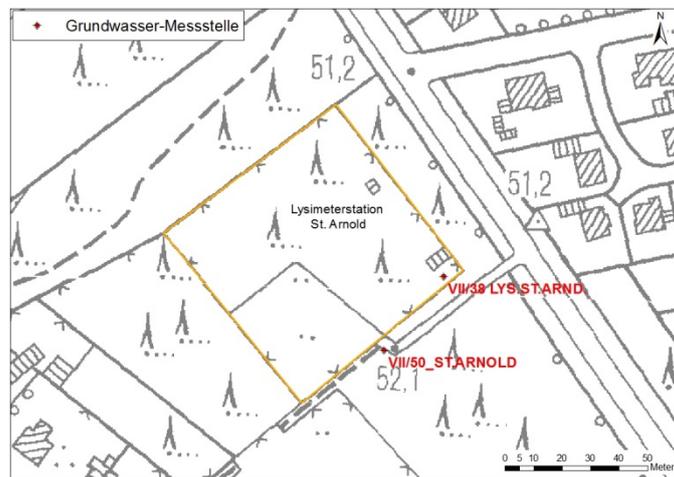
### **Class-A-Kesselverdunstung**

Hierbei handelt es sich um einen 35 cm, ehemals über dem Boden stehenden, mit Wasser befüllten Kessel mit einer offenen Fläche von 1,17 m<sup>2</sup>. Er war der Sonneneinstrahlung und dem Wind direkt ausgesetzt. Der täglich abgelesene Wasserverlust soll ein Maß für die potenzielle Verdunstung darstellen. Dabei muss der gefallene Niederschlag berücksichtigt werden. Weil jedoch die ständig neu herangeführte Luft im Kessel eine höhere Verdunstung verursacht als real auf der Landfläche gegeben ist, sind die Messwerte bis auf einen Vergleich verschiedener Gebiete unter genormten Bedingungen wenig aussagekräftig. Daher wurden diese Messungen im Jahr 1990 eingestellt. Ersetzt wird die direkte Messung der potenziellen Verdunstung seit dem 1. November 1997 durch eine automatische Berechnung nach HAUDE (1955) aus hier erfassten meteorologischen Daten (s. dazu auch Abbildung 7).

## Grundwasserstandsmessungen

Unmittelbar an der Grundstücksgrenze zur Lysimeteranlage wird der Grundwasserstand an zwei Beobachtungsbrunnen gemessen. Die Lage der Beobachtungsbrunnen geht aus Abbildung 16 hervor. Die Messstellen erfassen das Grundwasser im Münsterländer Kiessandzug (s.a. Kapitel 2.2). Somit kann ein Bezug zwischen den Sickerwasserabläufen der Lysimeter und den Grundwasserstandsschwankungen am Gelände der Lysimeteranlage hergestellt werden.

Die Messstelle VII/38 LYS.ST.ARND. befindet sich in der Nähe des Modellhauses auf dem Lysimetergrundstück (Abbildung 16 und Abbildung 17, links). Sie wurde im Januar 1962 gebaut und ist ca. 9,5 m tief. Der Grundwasserstand, der hier im Mittel 4,7 m unter Gelände liegt, wurde seit November 1970 wöchentlich, jeweils montagsmorgens mit einem Lichtlot bis Ende Oktober 2014 gemessen. Ab November erfolgen die Messungen monatlich. Seit November 1984 werden ein bis zweimal jährlich aus dem Rohrbrunnen (100 mm Durchmesser) Grundwasserproben für chemische und physikalische Analysen gezogen.



**Abbildung 16:**

Lageplan der Lysimeteranlage mit den Grundwassermessstellen VII/38 LYS.ST.ARND., Nr. 110070380 und VII/50\_ST.ARNOLD, Nr. 110070501 (Kartengrundlage: Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2015)

Der Beobachtungsbrunnen VII/50\_ST.ARNOLD steht unmittelbar am Eingang zum Anlagengrundstück (Abbildung 16 und Abbildung 17, rechts). An dieser ca. 22 m tiefen Messstelle, die im September 1998 eingerichtet wurde, gibt es von Dezember 1998 bis Oktober 2014 mittels Datenlogger täglich gewonnene Messwerte des Grundwasserstandes, der hier im Mittel bei 5,5 m unter Flur liegt. Danach erfolgten bis Oktober 2017 halbjährliche Messungen, die ab November bis Januar 2018 von Einzelmessungen abgelöst wurden. Zurzeit ist die Messstelle inaktiv. Auch wurden an dem 125 mm dicken Rohrbrunnen für die chemische und physikalische Grundwasseranalyse ein- bis zweimal jährlich Wasserproben von Juni 2002 bis Juni 2009 entnommen.



**Abbildung 17:** Grundwassermessstelle VII/38 LYS.ST.ARND. am Modellhaus (links), Grundwassermessstelle VII/50\_ST.ARNOLD am Eingang der Lysimeteranlage (rechts)

## 2.4 Einrichtungen für die Öffentlichkeitsarbeit

Dem Besucher der Lysimeteranlage steht ein Besichtigungsraum im Modellhaus (Abbildung 18) mit einem von FLENDER eigens erstellten maßstabgetreuen Modell der Lysimeteranlage zur Verfügung, das auch die von außen nicht mehr sichtbaren Vorrichtungen zeigt (s.a. Abbildung 4). Auf Wunsch werden auch Gruppenführungen mit fachtechnischen Erläuterungen abgehalten.



**Abbildung 18:** Modellhaus

## 2.5 Größere historische Veränderungen und besondere Ereignisse an der Anlage

Anfangs wurde das Lysimeterbecken 1 mit Heidekraut und Wacholder bepflanzt und nach fast zwei Jahren, am 1. September 1965 wegen seiner flächenmäßig größeren Bedeutung und der besseren Vergleichsmöglichkeiten zu anderen Lysimetern in Grünland umgewandelt.

Das Becken 2 (Laubwald) trug zu Beginn eine Mischung von 12 Laubholzarten, die als 9 dm hohe Heister gepflanzt wurden. Im April 1970 erfolgte eine Umwandlung zu einem Eichen-Buchenbestand mit ca. 50 cm hohen Setzlingen und Nachpflanzungen von Stieleiche in den Jahren 1972, 1973, 1977 und 1978 als Ersatz für die wegen Trockenheit ausgefallenen Rotbuchen. Die Anzahl der Bäume vermehrte sich bis 1978 auf 316 und sank dann bis 1990 durch natürlichen Abgang auf 201 Stämme (SCHROEDER 1992). Die mittlere Bestandshöhe hatte bis 1990 auf 7,28 m zugenommen und liegt 2016 von den noch vorhandenen 27 Stämmen bei ca. 22 m (s.a. Kapitel 3.1.2.2). Die Umwandlung der praxisfremden Bestände an den Lysimetern 2 und 3 erfolgte auf Anregung des damaligen Arbeitskreises „Wald und Wasser“.

Das Becken 3 (Nadelwald) wurde anfänglich mit Jungpflanzen von Weymouthskiefern und Beimischungen von Fichte und Douglasie bestückt, von denen seit 1972 nur noch die Kiefer gehalten wurde, die ein überdurchschnittliches Wachstum aufwies. Die bis Herbst 1974 auf 280 angestiegene Stammzahl wurde durch Hiebmaßnahmen bis 1990 auf 67 reduziert. Bis dahin hat die mittlere Baumhöhe auf 13,49 m zugenommen und betrug 2007 vor der Zerstörung durch den Sturm Kyrill 17,60 m der damals noch verbliebenen 37 Stämme.

Am 18. und 19. Januar 2007 hatte der Sturm Kyrill an dem Nadelwald-Lysimeter erhebliche Schäden angerichtet. Dort wurden fast alle Bäume entwurzelt und der Zaun zum Nachbargrundstück sowie die Auffangwanne beschädigt (Abbildung 19, links bis Abbildung 20, links). Damit endeten dort nicht nur die Messungen des durchtropfenden Niederschlags und der Stammabläufe, sondern auch die Existenz des Kiefernwaldbestandes in dem Lysimeter. Er wird seither durch den Pionierwald ersetzt, bei dem es sich fast ausschließlich um einen Laubmischwaldbestand handelt.

Nach der Jungentwicklung bis 1977 haben sich die für die jeweilige Vegetation charakteristischen Messergebnisse eingestellt, während sie für die Zeit zuvor mit der Einschränkung zu sehen sind, weil sich der in die Becken eingefüllte Boden noch nicht in die Ausgangslage gesetzt hatte.

Der Messbetrieb wurde mit Beginn des Abflussjahres 1965 (1.11.1964) aufgenommen, zunächst nur für den Niederschlag. Ab November 1965 folgten dann die Messungen der Lysimeterabläufe. Die Interzeptionsmessungen begannen im Mai 1976, zunächst mit den Wannen für den durchtropfenden Niederschlag, im folgenden Jahr mit den Messeinrichtungen für den Stammablauf an den Kiefern. Die Stammablaufmessungen an dem Eichen-Buchenbestand fanden wegen des zögerlichen Aufwuchses erst ab Mai 1982 statt. Zuerst konnte nur in der warmen Jahreszeit gemessen werden. Die aufgetretenen Mängel waren

seit 1984 weitgehend beseitigt. Von da an liegen ganzjährige Messreihen vor. Die Interzeptionsmessungen sind bis 1990 plausibilisiert vorhanden.

Qualitative Messungen an den Sickerwasserabläufen wurden bereits 1970 aufgenommen, zunächst für die Parameter Calcium, Kalium, Magnesium, Nitrat, Nitrit und Ammonium. Wegen der Zunahme des Stickstoffs im Sickerwasser am Kiefern-Bestand und der dafür als Ursache vermuteten Stoffeinträge durch den sauren Regen wurden zusätzlich der Freilandniederschlag, durchtropfender Niederschlag und Stammablauf beprobt und die Parameterliste auf Sulfat, Phosphat, Blei, Cadmium und Zink erweitert. Die Ergebnisse sind veröffentlicht (s. Kapitel 3.2). Dieses Messprogramm wurde 1984 beendet. In den Jahren 2003 und 2004 erfolgten weitere Untersuchungen durch die Universität Münster, 1996 und 2005 bis Frühjahr 2008 durch das ehemalige Staatliche Umweltamt Münster.



**Abbildung 19:** Lysimeter 3: Sturmschäden (links), zerstörte Auffangrinne (rechts)



**Abbildung 20:** Zerstörte Messeinrichtung für Stammablauf (links), Aufräumarbeiten am Lysimeter 3 (rechts)

Die Messungen am Class-A-Verdunstungskessel wurden 1990 eingestellt und mit ihnen auch die dazugehörigen Niederschlags- und Windmessungen in 0,4 m Höhe. Die Niederschlagsmessungen in Baumkronenhöhe und an einem weiteren Hellmann-Messgerät wurden ebenfalls in diesem Jahr beendet (s.a. Kapitel 2.3).

Im Jahr 2003 wurden vom Forschungszentrum Jülich ein Forschungskran und vier 24 m hohe Gerüsttürme als Arbeitsplattform und Träger für wissenschaftliche Geräte und Sensoren für ein bis 2008 vorgesehenes Forschungsprojekt zu den Folgen der Treibhausgasemissionen und zum Klimawandel aufgestellt. Die Gerüsttürme blieben vom Sturm Kyrill fast unbeschädigt und wurden 2008 wieder abgebaut. Auch die meteorologischen Messgeräte wurden nicht in Mitleidenschaft gezogen. Von ihnen wurde 2009 das freistehende Psychrometer (Abbildung 13, links) nach Frankenberger aufgrund eines Defektes außer Betrieb genommen und die Messungen mit dem seit 2006 aufgestellten Thermohygrogeber übernommen.

Ab dem 1. November 1997 stehen von den meteorologischen Messparametern und den Sickerwasserabläufen auch Fünf-Minuten-Werte zur Verfügung.

Seit 2003 werden die Messwerte des Niederschlags, seit 2008 die der Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit und seit 2009 der Temperatur und relativen Luftfeuchte per Fernübertragung online im Landesverwaltungsnetz für alle interessierten Behörden als ungeprüfte Rohdaten abgelegt. Eine Prüfung und Überarbeitung dieser Daten wie auch der anderen Daten erfolgt im Fachinformationssystem AquaZIS. Sie stehen dann für weitere Auswertungen grundsätzlich jedem zur Verfügung.

## 3 Erkenntnisse aus 50jährigen Zeitreihen

### 3.1 Quantitative Messergebnisse

#### 3.1.1 Meteorologische Messungen

##### 3.1.1.1 Sonnenscheindauer

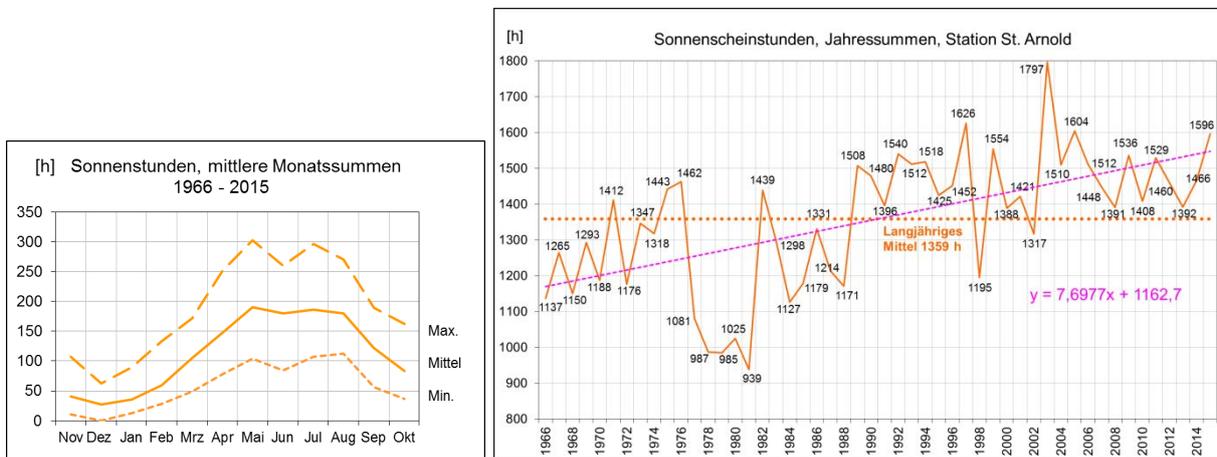
Im Durchschnitt schien die Sonne während der Zeit von 1966 bis 2015 im Jahr 1359 Stunden und zwar am längsten im Jahr 2003 mit 1797 Stunden und am wenigsten im Jahr 1981 mit nur 939 Stunden. Diese extreme Spanne von 858 Stunden machen 63 % aus, bezogen auf die durchschnittliche Jahressumme, was eine große Variabilität bedeutet. Noch extremer stellt sich dies bei Betrachtung der Monatssummen heraus. Da übersteigen fast immer die Schwankungsweiten der Sonnenscheindauer der einzelnen Monate ihre mittlere Sonnenstundenanzahl, und auch die Standardabweichung (mittlere Abweichung vom Durchschnitt) zwischen 20 und 56 % ist enorm. Ebenfalls groß sind die Unterschiede der Sonnenstunden bei den verschiedenen Monaten untereinander. So weist der Dezember als sonnenärmster Monat im Schnitt 27 Sonnenstunden auf und der Mai als sonnenreichster Monat 190 Stunden (Tabelle 1). In allen Monaten kann es Tage ohne Sonnenschein geben, im Jahr durchschnittlich etwa 85 Tage, während die höchste Sonnenstundenzahl von 14 pro Tag fast nur im Mai, Juni und Juli auftritt, aber recht selten und statistisch weniger als an einem Tag im Jahr. Dagegen ist wenigstens 10 Stunden Sonne an 27 Tagen zu erwarten.

**Tabelle 1: 50jährige mittlere Monats-, Halbjahres- und Jahressummen der Sonnenschein-Stunden mit statistischen Kennwerten**

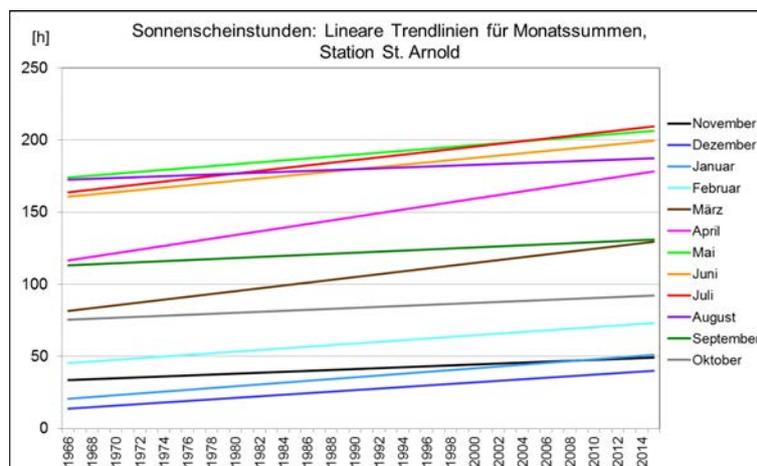
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Wi	Jahr
Mittel 1966/2015	41,3	26,9	35,8	59,3	105,5	147,3	416,1	1358,9
Standardabweichung	18,3	14,9	17,5	22,6	33,1	44,0	93,5	187,0
Max. 1966/2015	106,9	62,8	89,5	133,7	171,6	251,2	610,6	1796,8
Min. 1966/2015	10,8	0,5	12,5	28,5	49,3	78,0	248,0	938,6
Schwankungsweite	96,1	62,3	77,0	105,2	122,3	173,2	362,6	858,2
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	So	Jahr
Mittel 1966/2015	190,2	180,1	186,6	180,0	122,1	83,8	942,8	1358,9
Standardabweichung	46,3	47,0	47,0	36,2	31,8	24,6	130,0	187,0
Max. 1966/2015	302,8	260,0	296,5	270,8	189,3	162,2	1186,2	1796,8
Min. 1966/2015	104,0	84,5	106,8	112,0	56,0	36,8	676,0	938,6
Schwankungsweite	198,8	175,5	189,7	158,8	133,3	125,4	510,2	858,2

Wie aus der Tabelle 1 und Abbildung 21 (links) zu ersehen ist, zeichnen sich auch die Monate Juni bis August noch durch eine hohe Anzahl von Sonnenstunden aus. Der Rückgang im Juni ist auf eine vermehrte Wolkenbildung zurückzuführen (WEIß 1992). April bis August sind die Monate mit der größten Variabilität bzw. Schwankungsweite, wobei ihr Maximum mit 199 Stunden in den Mai fällt. Ziemlich stark ist die Änderung der Sonnenscheindauer im Jahresgang von Februar bis Mai und von August bis Oktober.

Bei Betrachtung der jährlichen Sonnenscheindauer von 1966 bis 2015 (Abbildung 21, rechts) fällt eine deutliche Zunahme der Sonnenstunden auf (hoch signifikant, F-Test der Regressionsgeraden). Diese Tendenz scheint mehr oder weniger auch bei allen Monaten über die 50 Jahre betrachtet, vorhanden zu sein, signifikant in den Wintermonaten bis einschließlich März. Hieraus resultiert insgesamt eine statistisch signifikante Zunahme der Sonnenscheindauer für das Winterhalbjahr. Dagegen ist im Sommerhalbjahr eine solche Zunahme nicht so deutlich, am geringsten in der Zeit von August bis November (Abbildung 22).



**Abbildung 21:** Jahresgang der monatlichen Sonnenscheindauer im Mittel (links), jährliche Sonnenscheindauer von 1966 bis 2015 (rechts)

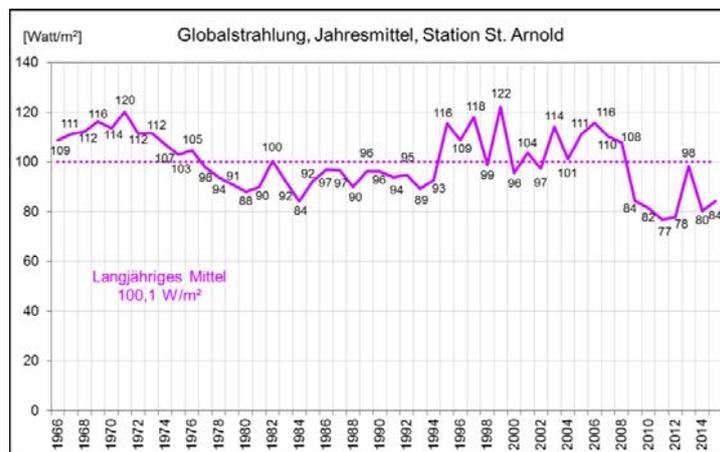


**Abbildung 22:** Tendenzen in der monatlichen Sonnenscheindauer von 1966 bis 2015

### 3.1.1.2 Globalstrahlung

Die Globalstrahlung besteht aus einem kurzwelligen Anteil der Himmelsstrahlung, der direkt von der Sonne her einfällt sowie aus einem diffusen Anteil, der über die Streuung, z.B. an Wolken oder Staubteilchen und durch Reflexion auf die Erdoberfläche trifft. Im Jahresmittel sind diese beiden Anteile etwa gleich groß. Die Globalstrahlung wird als Energie in Joule pro Quadratmeter und Minute ( $\text{Joule}/\text{cm}^2/\text{min}$ ) oder Tag ( $\text{Joule}/\text{cm}^2/\text{d}$ ) angegeben (nach WRR: Welt-Radiometrie-Referenz) oder als Einstrahlungsleistung bzw. Bestrahlungsstärke meist in Watt pro Quadratmeter ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) ausgedrückt (Momentanwert oder Stundenmittel). Sie hat für die Photovoltaik eine große Bedeutung, für deren Bemessungsgrundlage die eingestrahelte Energie in Kilowattstunden pro Quadratmeter pro Jahr ( $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{a}$ ) gebräuchlich ist (s.a. Tabelle 2).

Aus den Tagesmittelwerten wurden das Monatsmittel errechnet und daraus das Jahresmittel. Mit der Sonnenscheindauer steht die Globalstrahlung in engem Zusammenhang. Sie beträgt in den Jahren 1966/2015 im Mittel  $101 \text{ W}/\text{m}^2$ .

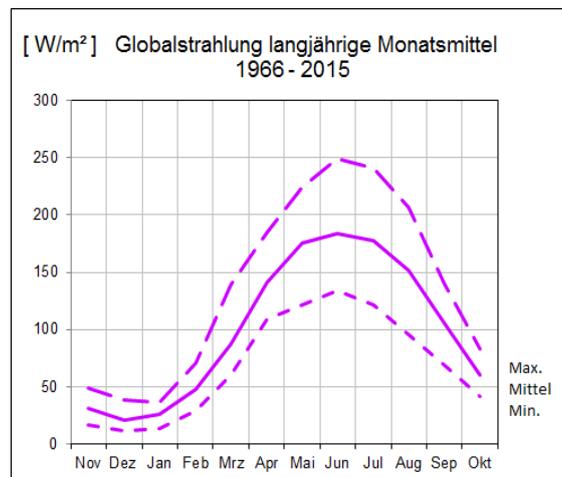


**Abbildung 23:** Mittlere jährliche Globalstrahlung von 1966 bis 2015

Trotz einiger Messlücken und Ergänzungen fehlender Werte folgt auch hier die Ganglinie der Globalstrahlung (Jahresmittel) ihrem deutschlandweit beobachteten, schwingungsartigen Verlauf, der eine Periode von etwa 70 Jahren aufweist (DEUTSCHER WETTERDIENST 2012). Demnach ist ein Abnehmen der Strahlung in den 1960er Jahren festzustellen mit einem Tief in den 80er Jahren und mit nachfolgendem Wiederanstieg. Ein gewisses Konformgehen mit der Sonnenscheindauer dabei ist erkennbar (Abbildung 21, rechts und Abbildung 23). Als aussagekräftiger für die Planung der Energiegewinnung erweisen sich die Monatsmittel (Tabelle 2 und Abbildung 24). Danach fällt das durchschnittliche Minimum der Globalstrahlung mit rd.  $21 \text{ W}/\text{m}^2$  in den Dezember, das Maximum liegt im Juni mit  $184 \text{ W}/\text{m}^2$ , gefolgt vom Juli in ähnlich hoher Größenordnung. Damit ist in den Maximum-Monaten die Strahlung neunmal stärker als im Dezember. Ab August vollzieht sich die Abnahme der Strahlungsintensität dann schon merklicher, die im September und Oktober rasch absinkt.

**Tabelle 2:** 50jährige Monats-, Halbjahres- und Jahresmittel der Globalstrahlung in Watt pro m<sup>2</sup> und statistische Kennwerte sowie Energieeinträge (Summen) in kWh/m<sup>2</sup>

	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Wi	Jahr
Mittel 1966/2015	30,8	20,6	25,7	48,3	87,2	140,6	58,9	100,6
Standardabweichung	7,8	6,1	5,8	9,5	15,3	19,1	7,0	8,5
Max. 1966/2015	49,3	38,7	36,9	70,9	138,7	185,2	77,6	120,3
Min. 1966/2015	16,7	12,0	13,8	29,1	59,2	109,1	43,9	84,3
Schwankungsweite	32,6	26,7	23,1	41,8	79,5	76,1	33,7	36,0
Mittlere monatl. Tagessumme	0,738	0,495	0,617	1,159	2,093	3,374		
Mittlere Monats-, Halbjahres-, Jahressumme	22,1	15,3	19,1	32,4	64,9	101,2	255,2	883,9
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	So	Jahr
Mittel 1966/2015	175,9	184,3	177,3	151,5	105,2	60,2	142,4	100,6
Standardabweichung	22,7	28,5	27,1	21,4	14,7	11,3	13,5	8,5
Max. 1966/2015	224,0	248,6	240,7	206,4	139,6	83,3	171,2	120,3
Min. 1966/2015	121,9	134,3	121,2	94,1	68,3	40,9	106,8	84,3
Schwankungsweite	102,1	114,3	119,5	112,3	71,3	42,4	64,4	36,0
Mittlere monatl. Tagessumme	4,223	4,422	4,255	3,637	2,525	1,445		
Mittlere Monats-, Halbjahres-, Jahressumme	130,9	132,7	131,9	112,8	75,7	44,8	628,7	883,9



**Abbildung 24:** Jahrgang der monatlichen Globalstrahlung im langjährigen Mittel

Die Monate mit der geringsten Strahlung November bis Januar weisen auch zwischen den Monatsmitteln die kleinsten Amplituden auf. Dagegen können von März bis September erhebliche Schwankungen in der Strahlung auftreten, die bisher im Juli mit  $120 \text{ W/m}^2$  den Höchstwert erreicht hat, aber im Mai und Juni mit 102 bzw. 114 ebenfalls noch hoch ist.

Die relativ geringe Standardabweichung im Jahresmittel von knapp 9 und im Sommer von unter  $30 \text{ W/m}^2$  sowie die Extremwerte im Jahresdurchschnitt zwischen 120 und  $84 \text{ W/m}^2$  versprechen ein ziemlich gleichbleibendes Angebot in der Strahlungsenergiemenge. Der absolut höchste Wert wurde mit  $1061 \text{ W/m}^2$  am 13. Juni 1998 um 13 Uhr seit der kontinuierlichen Aufzeichnung mittels Datenlogger gemessen.

### 3.1.1.3 Lufttemperatur

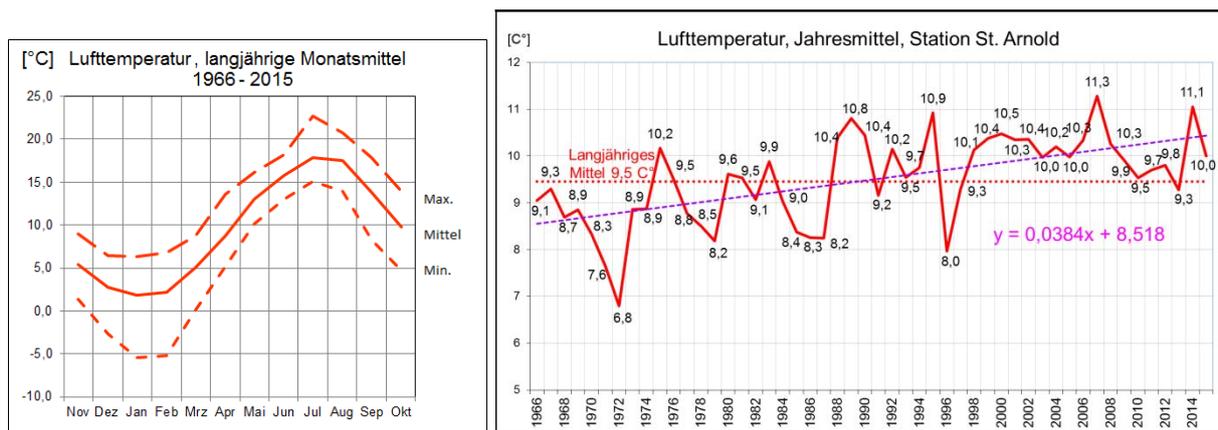
In St. Arnold wurde das Tagesmittel der Lufttemperatur aus der Ganglinie des Thermografen ermittelt, bevor die kontinuierlichen Zahlenwerte ab dem 1. November 1997 verfügbar waren. Die vom Deutschen Wetterdienst aus drei täglichen Teminmessungen berechnete und als „Klimamittel“ bezeichnete mittlere Lufttemperatur zeigte nach WEIß (1992) kaum Abweichungen zu der mittleren Lufttemperatur, die aus den beiden täglichen Extremwerten als arithmetisches Mittel berechnet wurde. Daher gab WEIß (1992) dieser Methode den Vorzug, anstatt das Tagesmittel aus der Ganglinie zu ermitteln, da hierbei subjektive Fehler nicht auszuschließen sind (die sich nach einer Analyse im Schnitt jedoch als gering erwiesen haben). Aus den Tagesmittelwerten der Lufttemperatur werden die Monats- und Jahresmittel berechnet.

Das langjährige Mittel der Lufttemperatur liegt bei  $9,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der kälteste Monat mit  $1,9 \text{ }^\circ\text{C}$  ist der Januar, der wärmste der Juli mit  $17,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Daraus ergibt sich eine Jahresschwankung von  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vergleicht man diese Mittelwerte früherer Zeitreihen, z.B. 1966/90 (SCHROEDER 1992, WEIß 1992), so ist ein Temperaturanstieg festzustellen, so z.B. beim langjährigen Mittel von damals 9 auf jetzt  $9,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der steigende Trend verläuft bis 1997 und ist von da an leicht rückläufig (auch landesweit zu beobachten). Dies geht deutlich aus der Abbildung 25 (rechts) hervor, in der als Zeitreihe die Jahresmittel aufgetragen sind. Der Anstieg ist statistisch signifikant und gilt für das Winter- und Sommerhalbjahr. Er spiegelt sich auch bei Betrachtung der durchschnittlichen Lufttemperatur der einzelnen Monate in der Zeitreihe wider, mit Signifikanz für März bis Juli sowie September und November (Abbildung 26).

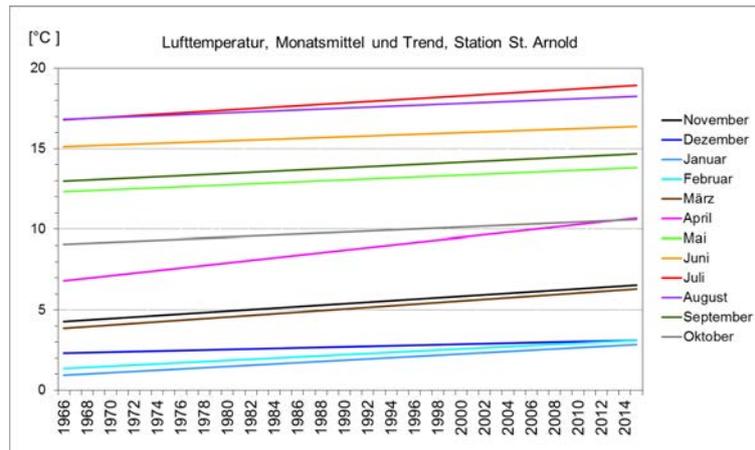
Im Jahresgang liegen die Monate Januar und Februar mit  $1,9$  und  $2,2 \text{ }^\circ\text{C}$  ähnlich niedrig. Zum März hin erfolgt eine deutliche Temperaturzunahme, bis im Juli das höchste Niveau erreicht und im August fast noch gehalten wird. Mit September beginnt ein allmählicher Rückgang der Temperatur, der sich etwa gleichermaßen bis Dezember fortsetzt, um dann auf das Januar-Februar-Niveau abzusinken (Abbildung 25, links).

**Tabelle 3:** 50jährige Monats-, Halbjahres- und Jahresmittel der Lufttemperatur in °C mit statistischen Kennwerten

	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Wi	Jahr
Mittel 1966/2015	5,4	2,7	1,9	2,2	5,1	8,7	4,3	9,5
Standardabweichung	1,6	2,1	2,8	2,6	2,1	1,8	1,3	0,9
Max. 1966/2015	9,0	6,4	6,3	6,8	8,7	13,6	7,7	11,3
Min. 1966/2015	1,4	-2,7	-5,4	-5,2	0,1	5,2	2,1	6,8
Schwankungswerte	7,6	9,1	11,7	12,0	8,6	8,4	5,6	4,5
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	So	Jahr
Mittel 1966/2015	13,1	15,8	17,9	17,5	13,8	9,8	14,6	9,5
Standardabweichung	1,5	1,2	1,9	1,4	1,7	1,9	0,9	0,9
Max. 1966/2015	16,1	18,2	22,7	20,7	17,8	14,0	16,9	11,3
Min. 1966/2015	10,1	13,0	15,1	13,9	8,3	4,7	11,2	6,8
Schwankungswerte	6,0	5,2	7,6	6,8	9,5	9,3	5,7	4,5

**Abbildung 25:** Jahrgang der monatlichen Lufttemperatur im langjährigen Mittel (links), mittlere jährliche Lufttemperatur von 1966 bis 2015 (rechts)

Die Standardabweichung der Monatsmittel weist in den Wintermonaten Dezember bis Februar ihre höchsten Werte von über 2 °C mit einem Maximum bei 2,8 °C im Januar auf und sinkt dann im März von 2,1 auf 1,2 °C im Juni ab. In die Monate Februar und Juli fallen die beiden Schwankungsextrema mit 12 und 5,2 °C. Aus der Tabelle 3 ist anhand der Standardabweichung und der Schwankungswerten zu entnehmen, dass in den Monaten Dezember bis März eine stärkere Variabilität herrscht als in den übrigen Monaten, wobei die hohe Schwankungswerte des Septembers von 9,5 und auch des Oktobers von 9,3 °C auffällt.



**Abbildung 26:** Tendenzen in der Entwicklung der mittleren monatlichen Lufttemperatur von 1966 bis 2014

Neben dem langjährigen Monatsmittel der Lufttemperatur sind in Tabelle 3 für den jeweiligen Monat auch die minimale und maximale mittlere Lufttemperatur aufgeführt. So wurde das tiefste Monatsmittel mit  $-5,4\text{ °C}$  im Januar 1985 konstatiert, gefolgt von  $-5,2\text{ °C}$  im Februar 1986 (wobei das Jahr aus dieser Tabelle nicht hervorgeht). Die höchste mittlere monatliche Lufttemperatur wurde mit  $22,7\text{ °C}$  im Juli 2006 festgestellt. Unter den Spalten für das hydrologische Winterhalbjahr (Wi) und Sommerhalbjahr (So) sowie unter Jahr stehen die entsprechenden langjährigen Mittelwerte sowie die minimalen und maximalen Werte, wie sie in dem betreffenden Halbjahr und Jahr aufgetreten sind. So liegen das geringste Jahresmittel der Lufttemperatur bei  $6,8\text{ °C}$  aus dem Jahr 1972 und das höchste bei  $11,3\text{ °C}$  im Jahr 2007.

Das absolute Minimum der Lufttemperatur ist am 7. und 8. Januar 1985 mit  $-22,5\text{ °C}$  gemessen worden, das absolute Maximum am 2. Juli 2015 mit  $38,7\text{ °C}$ . Die Schwankungsbreite zwischen der absoluten Lufttemperatur (LT) beträgt somit  $61,2\text{ °C}$ .

Das höchste Tagesmittel der Lufttemperatur betrug  $33\text{ °C}$  (gemessen am 14. August 1985). Tage mit mittleren Temperaturen von über  $25\text{ °C}$  kamen während der 50 Jahre 81-mal vor, was statistisch etwa 1,6 Tage pro Jahr bedeutet.

Unterschieden werden Tage mit bestimmten Lufttemperatur-Schwellenwerten: Eistage mit  $LT_{\max} < 0\text{ °C}$ , Frosttage mit  $LT_{\min} < 0\text{ °C}$ , Sommertage mit  $LT_{\max} \geq 25\text{ °C}$ , heiße Tage mit  $LT_{\max} \geq 30\text{ °C}$ . Somit ist gleichzeitig jeder Eistag ein Frosttag und jeder heißer Tag ein Sommertag.

Nach einer Analyse von WEIß (1992) können Eistage von November bis März auftreten, Frosttage in allen anderen Monaten außer im Juli und August. Sommertage wurden in den Monaten April bis Oktober registriert, unter denen die wenigen heißen Tage gewöhnlich von Mai bis August vorkommen. Bemerkenswert ist der hohe mögliche Temperaturkontrast in den Übergangsmontaten April/Mai und September/Oktober.

### 3.1.1.4 Relative Luftfeuchte

Während früher an der Lysimeterstation St. Arnold das Tagesmittel der relativen Luftfeuchte und der 14 Uhr-Wert aus der Ganglinie des Hygrografen entnommen werden musste, stehen seit 1. November 1997 die kontinuierlichen Aufzeichnungen als Zahlenwerte direkt zu Verfügung.

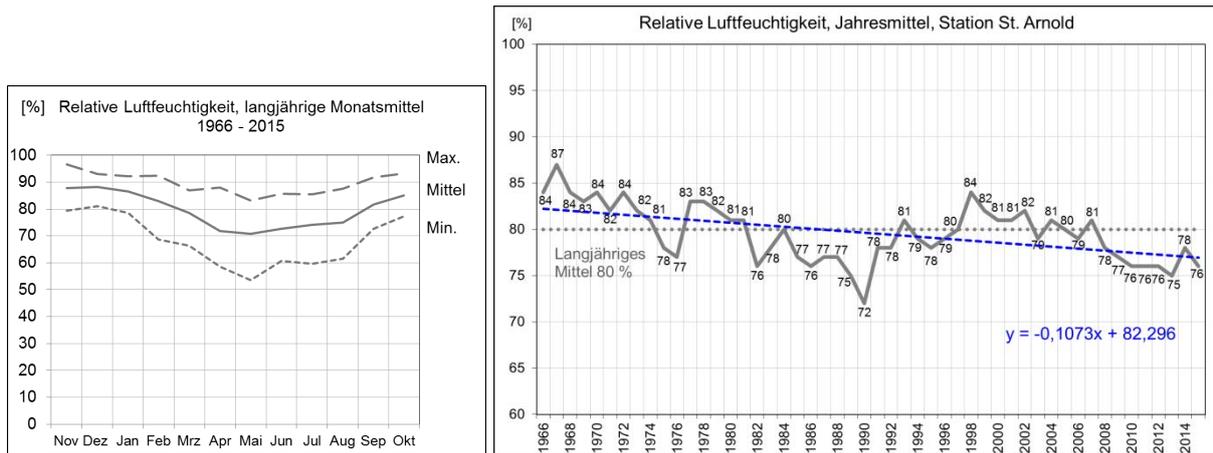
Im 50jährigen Mittel liegt die relative Luftfeuchte bei ca. 80 %. Sie beträgt im Winterhalbjahr im Schnitt 83 %, im Sommerhalbjahr 77 %. Der lufttrockenste Monat mit durchschnittlich 71 % ist der Mai, in den zugleich der Minimalwert von 54 % fällt. Der feuchteste Monat mit ca. 88 % ist der Dezember, gefolgt vom November mit einem fast ebenso hohen Wert. In diesem Monat liegt auch das durchschnittliche Maximum von 97 %. Zeitweilige Werte von 100 % wurden in allen Monaten gemessen, auch im Tagesmittel außer im Mai, Juli und August.

Der niedrigste und bisher nur einmal aufgetretene Tagesmittelwert wurde mit 25 % am 24. März 2013 verzeichnet, was gleichzeitig einer der kältesten März Tage war, ebenso das absolute Minimum von 5 %.

**Tabelle 4:** 50jährige Monats-, Halbjahres- und Jahresmittel der relativen Luftfeuchte in % mit statistischen Kennwerten

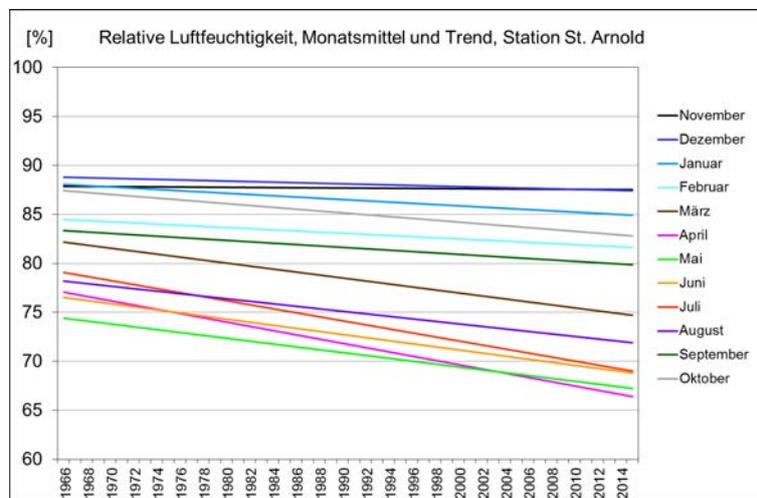
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Wi	Jahr
Mittel 1966/2015	87,7	88,1	86,5	83,0	78,4	71,7	82,6	79,6
Standardabweichung	3,2	2,6	3,0	4,8	4,6	7,0	2,9	3,1
Max. 1966/2015	96,6	93,0	92,1	92,4	86,9	88,0	88,8	86,9
Min. 1966/2015	79,4	81,1	78,6	68,7	66,4	58,5	74,3	72,3
Schwankungsweite	17,2	11,9	13,5	23,7	20,5	29,5	14,5	14,6
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	So	Jahr
Mittel 1966/2015	70,8	72,7	74,0	75,1	81,6	85,1	76,5	79,6
Standardabweichung	7,2	5,6	7,0	6,3	4,1	3,6	4,3	3,1
Max. 1966/2015	83,2	85,7	85,4	87,5	91,7	93,2	86,4	86,9
Min. 1966/2015	53,5	60,7	59,5	61,5	72,6	77,3	66,8	72,3
Schwankungsweite	29,7	25,0	25,9	26,0	19,1	15,9	19,6	14,6

Aus der Tabelle 4 und der folgenden Abbildung 27 (links) geht der mittlere Jahresgang der relativen Luftfeuchte hervor. Danach fällt sie von Dezember bis April rasch ab und bleibt dann nach Erreichen ihres Tiefstwertes im Mai meist zwischen ca. 72 und 75 % den Sommer hindurch bis Ende August auf niedrigem Niveau, um ab September wieder stetig bis auf ihre Höchstwerte im November und Dezember anzusteigen. Von Februar bis August sind die Standardabweichungen mit fast 5 bis über 7 % relativ hoch und auch die mittleren Schwankungsweiten zeigen in dieser Zeit ihre Höchstwerte mit einem Maximum von rd. 30 % im April und Mai.



**Abbildung 27:** Jahrgang der relativen Luftfeuchte im langjährigen Monatsmittel (links), mittlere jährliche relative Luftfeuchte von 1966 bis 2015 (rechts)

Betrachtet man die Entwicklung der relativen Luftfeuchte seit 1966, so ist insgesamt gesehen, eine Abnahme zu verzeichnen, sowohl im Winter- als auch im Sommerhalbjahr. Sie hielt deutlich bis 1990 an (Abbildung 27, rechts). Danach erfolgt ein Anstieg bis 1998, der wiederum von einem bis heute anhaltenden abnehmenden Trend abgelöst wird. Lag der durchschnittliche Wert der ersten 10 Jahre bis 1975 noch bei 83 %, so sank er für die folgende Dekade bis 1985 auf 80 % und von da an bis 1995 auf 77 %, stieg dann in den weiteren 10 Jahren bis 2005 auf 81 % an und liegt in den letzten zehn Jahren wieder bei 77 %.

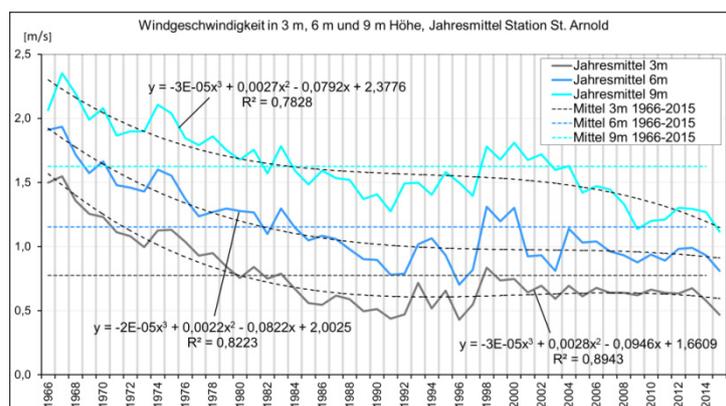


**Abbildung 28:** Tendenzen in der Entwicklung der mittleren monatlichen relativen Luftfeuchte von 1966 bis 2015

Dabei zeigt sich, dass in den Monaten November und Dezember so gut wie keine Veränderung über die Jahre erfolgt ist. Dagegen ist ein Trend zu einer Verringerung der Luftfeuchte in allen übrigen Monaten, signifikant vor allem im März und April sowie in den Sommermonaten Juli, August und im Oktober zu beobachten (Abbildung 28).

### 3.1.1.5 Wind

Anhand der Abbildung 29 ist zu entnehmen, dass die in 3 m, 6 m und 9 m Höhe gemessene Windgeschwindigkeit allgemein mit der Höhe zunimmt und zwar von rd. 1,5 m/s auf ca. 2,2 m/s. Jedoch ist bei allen drei Messhöhen zunächst ein abnehmender Trend in den Werten zu erkennen. So nimmt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in 3 m Höhe von anfänglich 1,5 m/s auf rd. 0,5 m/s ab. In ähnlicher Größenordnung ist die Abnahme auch auf höherem Messniveau (Abbildung 34). Diese statistisch signifikante Abnahme der Windgeschwindigkeit (F-Test d. Regressionsgeraden) steht sicherlich im Zusammenhang mit dem Aufwuchs der Waldbäume. An den drei Messpunkten wird etwa 1993 der abnehmende Trend der Windgeschwindigkeit gestoppt, und nach einem sprunghaften Anstieg im Jahr 1998 erfolgt wieder eine deutliche Abnahme der Windgeschwindigkeit in 9 m Höhe, die zwischenzeitlich vom Laubwaldbestand überschritten wurde. Alle weitere Interpretation der Veränderung der Windgeschwindigkeit an der Lysimeterstation bedarf einer genaueren Analyse unter Hinzuziehung von Windmessungen benachbarter Messstationen. Somit müssen die Windgeschwindigkeitsmesswerte in erster Linie unter dem Vorbehalt der örtlichen Gegebenheiten an der Lysimeteranlage St. Arnold gesehen werden. Dies gilt insbesondere bei Betrachtung der langjährigen Mittelwerte, da diese nicht frei von einem örtlich bedingten Trend sind. So liegt es nahe, anzunehmen, dass die Messwerte in 9 m Höhe zunächst am wenigsten durch die Bodenreibung beeinflusst sind. Tatsächlich gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten in 9 m Höhe der Station St. Arnold und Münster bis etwa 1974, wie aus dem Diagramm von HARSCH (2008) zu hervorgeht. Danach gehen die Kurven der Windgeschwindigkeit auseinander. Bis zu ihrem Absinken in St. Arnold lagen die Baumhöhen noch unter 6 m, so dass sie die Messung in 9 m Höhe bis dahin wohl noch nicht beeinflusst haben.

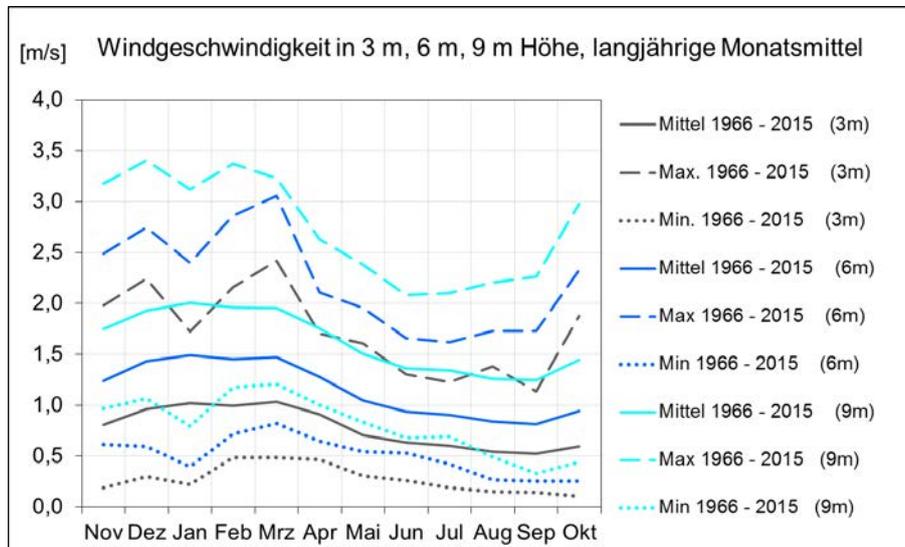


**Abbildung 29:** Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit von 1966 bis 2015

**Tabelle 5:** 50jährige Monats-, Halbjahres- und Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in m/s in 3, 6 und 9 m Höhe mit statistischen Kennwerten

	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Wi	Jahr
Mittel 1966/2015 (3m)	0,81	0,96	1,02	0,99	1,03	0,91	0,95	0,78
Standardabweichung (3m)	0,42	0,39	0,35	0,34	0,38	0,32	0,31	0,27
Max. 1966/2015 (3m)	1,98	2,24	1,72	2,16	2,42	1,70	1,81	1,55
Min. 1966/2015 (3m)	0,19	0,30	0,22	0,49	0,48	0,46	0,52	0,43
Schwankungsweite (3m)	1,79	1,94	1,50	1,67	1,94	1,24	1,29	1,12
Mittel 1966/2015 (6m)	1,24	1,43	1,49	1,45	1,47	1,28	1,39	1,15
Standardabweichung (6m)	0,47	0,44	0,43	0,44	0,42	0,36	0,34	0,30
Max. 1966/2015 (6m)	2,49	2,75	2,40	2,86	3,05	2,11	2,29	1,94
Min. 1966/2015 (6m)	0,61	0,59	0,39	0,72	0,82	0,64	0,83	0,70
Schwankungsweite (6m)	1,88	2,16	2,01	2,14	2,23	1,47	1,46	1,24
Mittel 1966/2015 (9m)	1,75	1,93	2,01	1,96	1,95	1,75	1,89	1,63
Standardabweichung (9m)	0,53	0,44	0,50	0,47	0,44	0,42	0,33	0,29
Max. 1966/2015 (9m)	3,18	3,40	3,12	3,37	3,23	2,63	2,67	2,35
Min. 1966/2015 (9m)	0,97	1,06	0,80	1,17	1,21	1,00	1,25	1,12
Schwankungsweite (9m)	2,21	2,34	2,32	2,20	2,02	1,63	1,42	1,23
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	So	Jahr
Mittel 1966/2015 (3m)	0,70	0,63	0,60	0,54	0,52	0,59	0,60	0,78
Standardabweichung (3m)	0,32	0,26	0,25	0,24	0,26	0,31	0,25	0,27
Max. 1966/2015 (3m)	1,61	1,30	1,22	1,38	1,14	1,87	1,29	1,55
Min. 1966/2015 (3m)	0,30	0,26	0,19	0,15	0,14	0,11	0,27	0,43
Schwankungsweite (3m)	1,31	1,04	1,03	1,23	1,00	1,76	1,02	1,12
Mittel 1966/2015 (6m)	1,04	0,94	0,91	0,84	0,82	0,94	0,91	1,15
Standardabweichung (6m)	0,37	0,29	0,30	0,28	0,33	0,40	0,29	0,30
Max. 1966/2015 (6m)	1,95	1,66	1,62	1,73	1,73	2,33	1,60	1,94
Min. 1966/2015 (6m)	0,54	0,53	0,42	0,27	0,25	0,26	0,44	0,70
Schwankungsweite (6m)	1,41	1,13	1,20	1,46	1,48	2,07	1,16	1,24
Mittel 1966/2015 (9m)	1,51	1,36	1,34	1,26	1,25	1,45	1,36	1,63
Standardabweichung (9m)	0,37	0,31	0,32	0,31	0,38	0,42	0,29	0,29
Max. 1966/2015 (9m)	2,38	2,08	2,10	2,21	2,26	2,97	2,03	2,35
Min. 1966/2015 (9m)	0,84	0,68	0,69	0,49	0,33	0,44	0,73	1,12
Schwankungsweite (9m)	1,54	1,40	1,41	1,72	1,93	2,53	1,30	1,23

Aus Tabelle 5 sind für alle drei Messniveaus sämtliche langjährigen Monats-, Halbjahres- und Jahresmittel ersichtlich. So beträgt in 9 m Höhe das langjährige Jahresmittel 1,6 m/s bei einer Standardabweichung von 0,3 m/s und einer Schwankung zwischen 2,4 und 1,1 m/s.

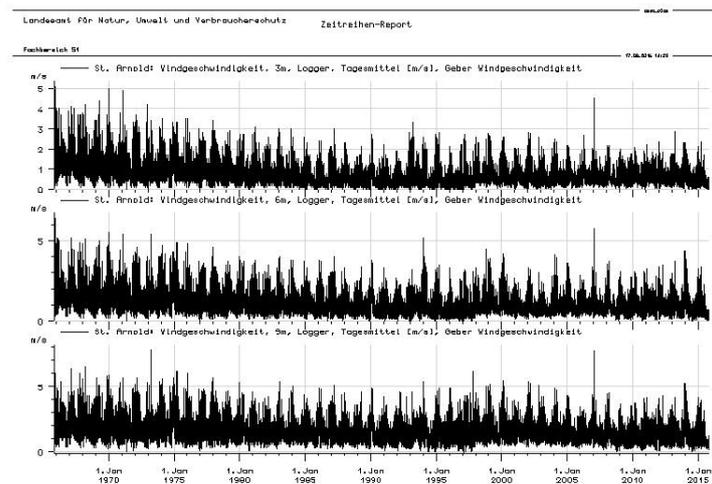


**Abbildung 30:** Jahresgang der Windgeschwindigkeit in 3 m, 6 m und 9 m Höhe im langjährigen Monatsmittel

Die Abbildung 30 zeigt, dass die stärkeren Winde von November bis April auftreten, im Mittel mit Geschwindigkeiten von 1,8 bis 2 m/s und Maxima bis 3,4 m/s und nach einem Abfall zum Sommer hin auf 1,3 m/s im August und September im Oktober wieder zunehmen. Die Standardabweichung liegt in den Monaten November bis April zwischen 0,4 und 0,5 m/s noch relativ gleichbleibend, wohingegen die Schwankung der Windgeschwindigkeit von 2,3 m/s hoch ist. Die hohen Monatsmittel von > 3 m/s sind nur von November bis März aufgetreten.

Wie aus der Abbildung 30 hervorgeht, weist die Windgeschwindigkeit in den drei Höhengniveaus einen prinzipiell ähnlichen Monatsgang auf.

Die höchsten Tagesmittel wurden am 10. Dezember 1965 mit 5,1 m/s in 3 m und 6,4 m/s in 6 m sowie am 2. April 1973 mit 7,8 m/s in 9 m Höhe gemessen. Während des Sturms Kyrill am 18. Januar 2007 gegen 21 Uhr wurde das absolute Maximum in 3 m Höhe mit 16,7 m/s, in 6 m Höhe mit 17,7 m/s und in 9 m Höhe mit 23,6 m/s aufgezeichnet. (das entspricht 85 km/h bzw. Windstärke 9 nach der Beaufort-Skala). Nicht zwangsläufig ergeben sich dadurch auch maximale Tagesmittel. Sie betragen an diesem Tag analog nur 4,6 m/s, 5,8 und 7,7 m/s. Das letzte Sturmereignis in Nordrhein-Westfalen vom 9./10. Juni 2014 (Pfingststurm), das besonders im Ruhrgebiet große Schäden verursacht hat, wirkte sich in St. Arnold kaum mehr aus. Es wurde in 9 m Höhe nur noch eine maximale Windgeschwindigkeit von 5,3 m/s (leichter Wind) registriert. Diese und weitere Tagesereignisse mit erhöhten Windgeschwindigkeiten kommen in der folgenden Abbildung zum Ausdruck.



**Abbildung 31:** Tagesmittel der Windgeschwindigkeiten in 3, 6, und 9 m Höhe der Zeitreihe von 1966 bis 2015

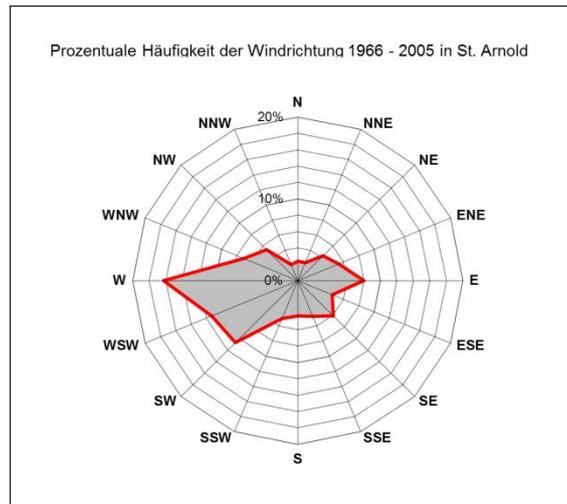
Die Windrichtung wird in 10 m Höhe gemessen und nach 16 Richtungssektoren unterteilt, die aus dem Kopf der folgenden Tabelle hervorgehen.

**Tabelle 6:** Mittlere Häufigkeit in Tagen/Jahr und % der Windrichtung **von 1966 bis 2005**

Windrichtung	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
Häufigkeit [d/a]	8,6	8,6	15,5	19,3	28,9	16,3	22,0	17,0
Häufigkeit [%]	2,4	2,4	4,3	5,4	8,0	4,5	6,1	4,7
	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
Häufigkeit [d/a]	15,6	18,1	38,6	40,8	58,7	25,6	19,3	7,7
Häufigkeit [%]	4,3	5,0	10,7	11,3	16,3	7,1	5,3	2,1

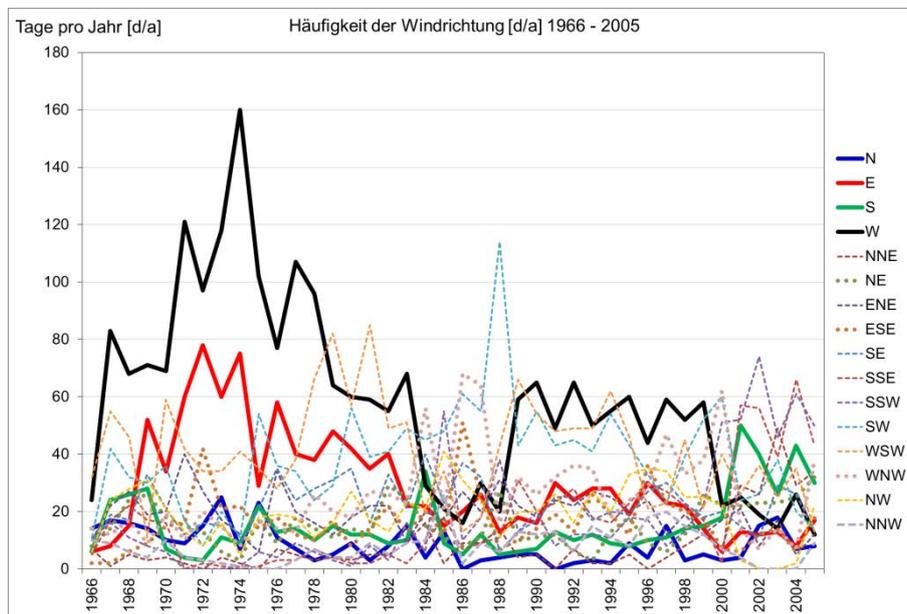
Wie aus der Tabelle 6 zu entnehmen, herrschen mit rd. 60 Tagen pro Jahr die Westwinde vor, gefolgt von Winden aus westsüdwestlicher und südwestlicher Richtung.

Zu rd. 38 % weht der Wind somit aus dem Bereich dieser Sektoren, denen WEIß (1992) zyklonale West- und Südwest-Wetterlagen zuordnet. Ein weiteres Maximum bildet die Ostrichtung, aus der an 29 Tagen der Wind kam und die antizyklonale Ost-Lage widerspiegelt. Die Nordrichtungen (N, NNE, NNW) mit unter 10 Tagen pro Jahr bzw. um 2 % und die Südrichtungen (S, SSE, SSW) mit weniger als 20 Tagen bzw. maximal 5 % sind relativ selten. Die Abbildung 32 veranschaulicht dies.



**Abbildung 32:** Windrichtungssektoren und Häufigkeit der mittleren jährlichen Windrichtung von 1966 bis 2005

Bei Betrachtung der Zeitreihe von 1966 bis 2005 (Abbildung 33) ist zu erkennen, dass die bislang vorherrschenden West- und Ost-Winde tendenziell an Dominanz verlieren, während die anderen Windrichtungen, besonders die drei südlichen, häufiger werden und die Varianz der Windrichtungen insgesamt zunimmt. Inwieweit diese Entwicklung auf die örtlichen Verhältnisse am Standort der Lysimeteranlage zurückzuführen sind, z.B. durch Verwirbelung infolge des Baumaufwuchses oder allgemein beobachtet werden, muss eine genauere Untersuchung zeigen (z.B. durch Vergleich an der Nachbarstation Greven).

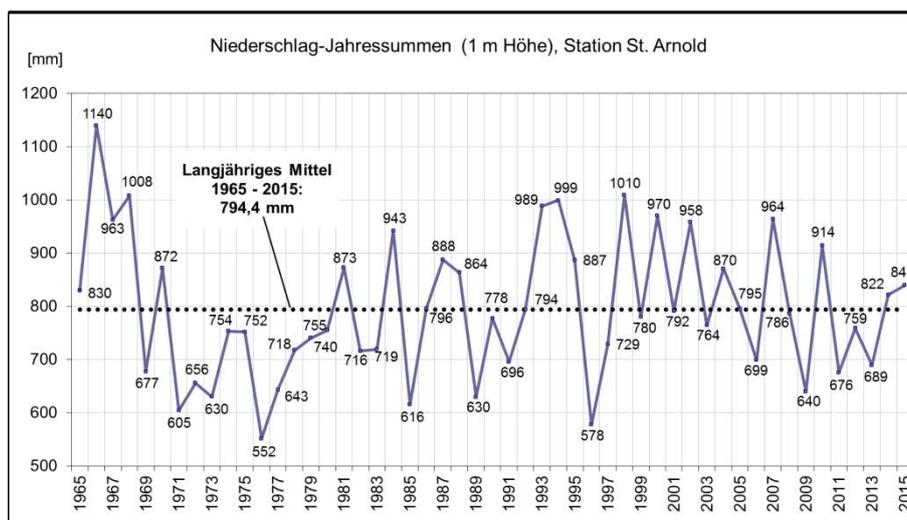


**Abbildung 33:** Entwicklung der Windrichtungen

### 3.1.1.6 Niederschlag

Der Niederschlag ist eine der wichtigsten Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung. Er bestimmt maßgeblich, welche Mengen an Wasser zu bewirtschaften sind. Daher wurde der Niederschlag unter verschiedenen Bedingungen an der Lysimeterstation gemessen, die im Einzelnen in Kapitel 2.3 beschrieben sind. Hier sollen zunächst nur die allgemeinen charakteristischen Beobachtungen des Niederschlags in St. Arnold dargelegt werden, wie sie am Messgerät in 1 m Höhe registriert werden, um damit auch einen Vergleich zu Messergebnissen an anderen Niederschlagsstationen zu ermöglichen.

Im Gegensatz zu den übrigen meteorologischen Messgrößen sowie den Sickerwasserabläufen an den Lysimetern wurden die Niederschlagsmessungen bereits am 1. November 1964 bzw. zu Beginn des Wasserwirtschaftsjahres 1965 aufgenommen, so dass hier eine 51jährige Niederschlagsmessreihe vorliegt (Abbildung 34). Vergleicht man die 51jährige Messreihe von 1965 bis 2015 mit der 50jährigen von 1966 bis 2015, so unterscheiden sich diese Reihen im langjährigen Mittel der jährlichen, halbjährlichen und monatlichen Niederschlagssummen nur um ca. einen Millimeter. Ebenso ist im Trendverhalten so gut wie kein Unterschied feststellbar. Somit sind praktisch die beiden Messreihen gleichermaßen für die 50jährige Zeitspanne des Bestehens der Lysimeteranlage repräsentativ.



**Abbildung 34:** Niederschlagsjahressummen von 1965 bis 2015

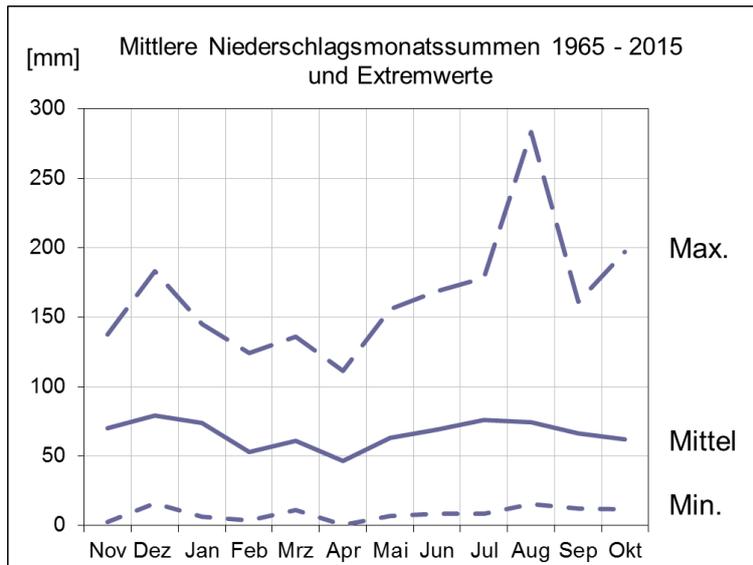
Der 50jährige mittlere jährliche Niederschlag der Wasserwirtschaftsjahre 1966/2015 beträgt also 793,7 mm und der 51jährige 794,4 mm der Reihe von 1965 bis 2015, also rund 794 mm. Die Schwankungen in der Jahressumme liegen in der Größenordnung eines Trockenjahres und sind damit beträchtlich. Sie können von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich sein (Abbildung 34). Das trockenste Jahr war 1976 mit 552 mm, das nasseste 1966 mit 1140 mm. Wie aus der Abbildung zu entnehmen, waren die ersten fünf Jahre meist überdurchschnittlich nass. Es folgten von 1971 bis 1980 Jahre mit geringen Niederschlägen und Schwankungen. Danach traten bis 1990 Jahre mit meist wieder größeren Schwankungen und Niederschlägen mal unter, mal über dem Durchschnitt auf. Sie werden durch eine Folge ziemlich unregelmäßiger Niederschlagschwankungen abgelöst bis ab 1998 Jahre mit über- und durchschnittlichen Niederschlägen regelmäßig bis zum Jahr 2005 abwechseln. Danach

nehmen bis 2011 die Schwankungen wieder zu und bleiben bis 2013 auf niedrigem Niveau. 2014 und 2015 wird dann der Durchschnitt leicht überschritten.

**Tabelle 7:** 51jährige mittlere Monats-, Halbjahres- und Jahressummen des Niederschlags in mm mit statistischen Kennwerten

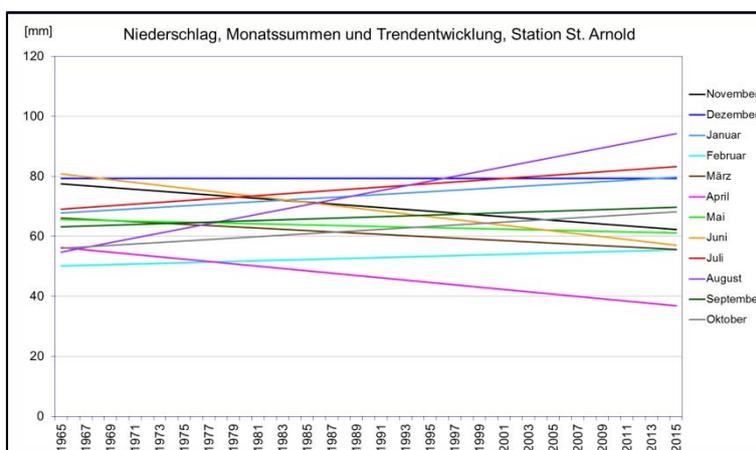
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Wi	Jahr
Mittel 1965/2015	69,88	79,27	73,70	52,80	60,87	46,52	383,05	794,42
Standardabweichung	28,26	38,06	35,06	29,99	31,03	26,55	83,09	131,93
Max. 1965/2015	137,5	183,2	145,1	124,4	136,0	111,3	611,6	1139,8
Min. 1965/2015	2,8	15,7	6,2	3,8	11,1	0,6	139,4	551,8
Schwankungsweite	134,7	167,5	138,9	120,6	124,9	110,7	471,6	588,0
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	So	Jahr
Mittel 1965/2015	63,35	68,90	76,10	74,51	66,45	62,06	411,37	794,42
Standardabweichung	29,32	32,52	38,97	47,03	36,52	33,69	90,10	131,93
Max. 1965/2015	155,7	168,6	178,4	283,4	161,0	196,9	644,0	1139,8
Min. 1965/2015	6,9	8,3	8,7	15,5	12,3	11,7	231,2	551,8
Schwankungsweite	148,8	160,3	169,7	267,9	148,7	185,2	412,8	588,0

Die Verteilung der mittleren monatlichen Niederschlagssummen weist die höchsten Beträge im Dezember und Januar sowie im Juli und August mit über 70 mm auf, während der Februar und April mit 53 und 47 mm relativ niederschlagsarm sind. Hier werden auch die Minimalwerte < 5 mm zusammen mit dem Monat November erreicht. Zugleich ist die Streuung um den Mittelwert bis zu 30 mm in diesen Monaten einschließlich Mai am geringsten. Am instabilsten in dieser Hinsicht mit einer Standardabweichung von über 38 mm sind Dezember sowie Juli und August. In Letzterem ist mit 283 mm die höchste Monatssumme aufgetreten (im Jahr 2010). Aber auch von Mai bis Oktober und im Dezember ist mit hohen Monatssummen von mehr als 150 mm zu rechnen. Die geringste Monatssumme von unter 1 mm wurde im April 2007 gemessen. Die höchste Tagessumme von 119 mm wurde am 26. August 2010 registriert.



**Abbildung 35:** Verteilung der monatlichen Niederschläge und Extrema im langjährigen Mittel

Bei Betrachtung der 50jährigen Zeitreihe stellt sich hier eine klare Tendenz einer Zunahme der jährlichen Niederschläge wie sie sich aus Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes seit 1881 ergibt, nicht dar (Abbildung 34). Verschiedene Zeitreihen weisen unterschiedliche Trends und Signifikanzen auf. Zum Beispiel weist die Zeitreihe ab 1969 ohne die sehr nassen Jahren 1965 bis 1968 einen signifikant (F-Test,  $\alpha=0,05$ ) steigenden Trend bei den Jahres- und Sommerhalbjahressummen auf. Bei den monatlichen Niederschlagssummen sind ebenfalls unterschiedliche Trends zu erkennen, dessen Auswirkungen sich in der Jahressumme aber meist aufheben. So fällt (nicht signifikant) vor allem in den April- und Juni-Monaten, abgeschwächt im März, Mai und November eine Tendenz zur Abnahme der Niederschläge auf, während der August, Oktober sowie Januar und Februar eher etwas niederschlagsreicher geworden sind (Abbildung 36).



**Abbildung 36:** Tendenzen in den monatlichen Niederschlägen von 1965 bis 2015

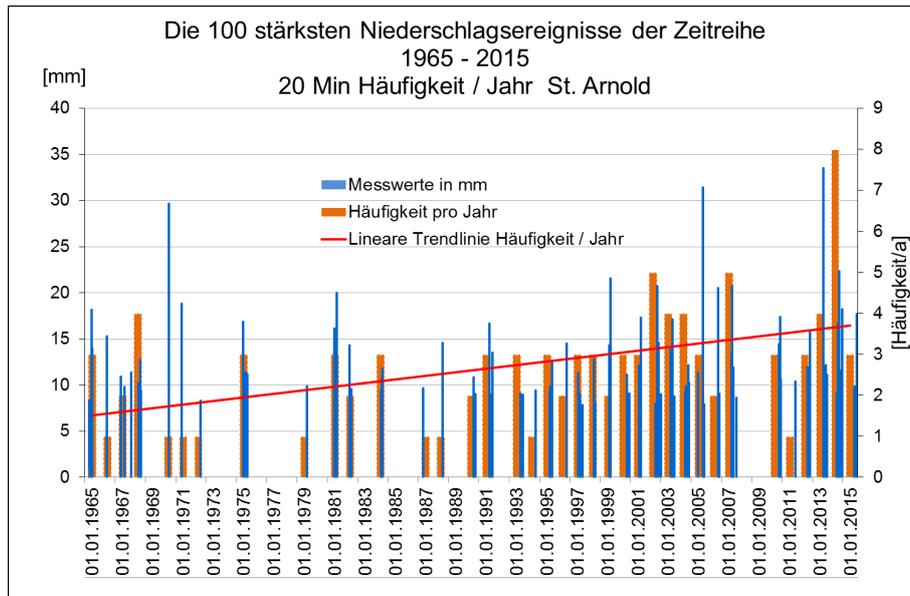
Nach früheren Auswertungen (SCHROEDER 1992, WEIß 1992) wurde in Bodenhöhe ein um fast 3 % höherer Niederschlag ( $N_0$ ) gemessen als in 1 m Höhe ( $N_1$ ), was auf die Windeinflüsse zurückgeführt wurde.

**Tabelle 8: Vergleich der mittleren Niederschlagssummen in mm am bodengleichen Messgerät und Messgerät in 1 m Höhe der Jahre von 1966 bis 2015 sowie der Unterschied**

1966/2015	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Wi	WWJ
Mittel $N_0$	70,28	78,84	73,15	53,15	61,15	45,55	382,12	792,39
Mittel $N_1$	70,40	78,99	73,48	53,34	61,26	45,60	383,06	793,71
$N_0 - N_1$	-0,12	-0,15	-0,33	-0,19	-0,11	-0,05	-0,94	-1,32
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	So	WWJ
Mittel $N_0$	62,51	68,61	74,87	74,47	67,07	62,74	410,27	792,39
Mittel $N_1$	62,60	68,60	74,93	74,52	67,17	62,83	410,65	793,71
$N_0 - N_1$	-0,09	0,01	-0,06	-0,05	-0,10	-0,09	-0,38	-1,32

Ein Vergleich dieser beiden Niederschlagsmessreihen mit den Werten auch der Jahre nach 1990 zeigt im Mittel diese deutlichen Unterschiede nicht mehr. Sie scheinen sich eher angeglichen zu haben. Die Gründe hierfür können nur nach einer detaillierteren Auswertung der Messergebnisse benannt werden. Möglicherweise spielen hierbei die veränderten Standortbedingungen infolge des Baumaufwuchses eine Rolle. Bereits WEIß (1992) hatte nach einer eingehenden Analyse der Niederschlagsereignisse festgestellt, dass die Niederschlagsmengen im Intervall von 0,1 – 1 mm in 1 m Höhe größer sind als in Bodenhöhe. Erst die höheren Niederschlagsklassen ließen die Windeinwirkung erkennen, indem ab der Klasse 0,5 mm eine Verringerung der Niederschlagsmenge in der Auffanghöhe 1 m zu verzeichnen war. Inwieweit dabei allerdings noch die gerätebedingte Erfassungsgenauigkeit zu berücksichtigen ist, muss vorerst offen bleiben.

In den letzten Jahren häufen sich die extremen Ereignisse des Wettergeschehens, wobei insbesondere starke Niederschläge wie auch Windereignisse wahrgenommen werden. So gab es im Jahr 2014 neben dem großen Pfingststurm auch einen Starkregen im Raum Münster, bei dem am 28. Juli in der Nacht zum 29. Juli 292 Liter pro Quadratmeter innerhalb sieben Stunden fielen und davon 220 Liter innerhalb eineinhalb Stunden. Im Vergleich dazu ist der bisher höchste Regen in Deutschland mit 312 mm am 12./13. August 2002 im Erzgebirge niedergegangen, allerdings innerhalb 24 Stunden. Das Starkregenereignis von Münster wirkte sich bis in das etwa 10 km entfernte Greven aus. Dagegen war davon im ca. 30 km entfernt liegenden Gebiet um St. Arnold nichts mehr zu spüren. Hier wurden zu dieser Zeit nur 11,3 mm Niederschlag gemessen und auch kein Unterschied in der Menge zwischen dem bodengleichen und 1 m hohen Messgerät festgestellt. Als Starkregen gelten in Deutschland beispielsweise Regen, bei denen mehr als 5 mm in fünf Minuten oder mehr als 10 mm in 20 Minuten oder mehr als 17,1 mm in 1 Stunde fallen.



**Abbildung 37:** Starkregenerenisse und Häufigkeit

Aus den Aufzeichnungen der Niederschlagsereignisse in St. Arnold geht hervor, dass die Häufigkeit der Starkregen in den letzten Jahren zugenommen hat (Abbildung 37), was eine Auswirkung des Klimawandels vermuten lässt.

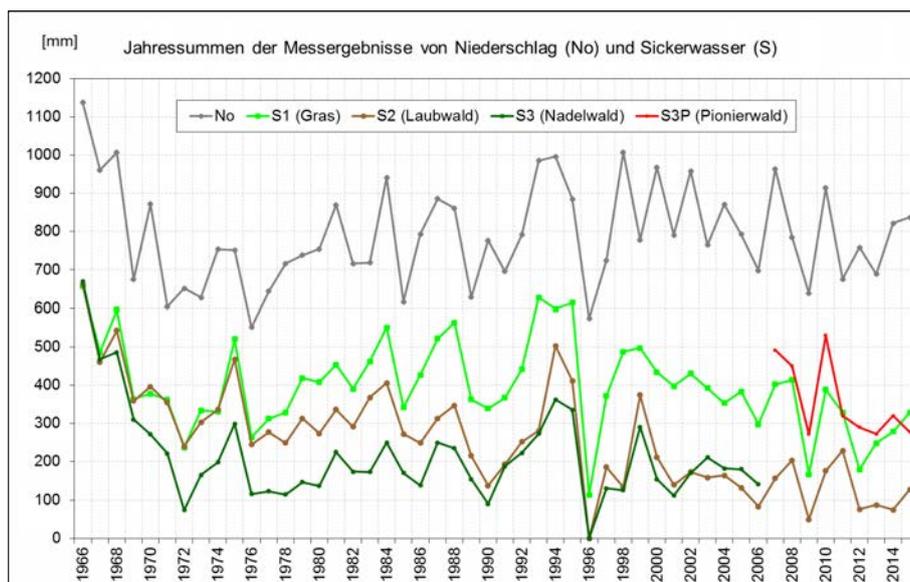
## 3.1.2 Lysimetrische Messungen

### 3.1.2.1 Sickerwasserabläufe und Gesamtverdunstung

#### Sickerwasser

Die Sickerwasserabläufe an den drei Lysimeterbecken entsprechen der Grundwasserneubildung an diesem Standort und sind somit eine wichtige Größe zur Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebotes. Sie werden im Folgenden bezeichnet mit S1 für das Grünland-Lysimeter, mit S2 für das Laubwald-Lysimeter (Eichen, Buchen), mit S3 für das einstige Nadelwald-Lysimeter (Weymouthskiefern) und mit S3P für das jetzige Pionierwald-Lysimeter. Mit der völligen Zerstörung des Weymouthskiefern-Bestandes am Lysimeter 3 durch den Sturm Kyrill im Januar 2007 (s.a. Kapitel 2.3) endeten dort praktisch die Messungen des Sickerwasserablaufs unter Nadelwald nach 41 Jahren. Die darauf folgenden Sickerwasserabläufe am Lysimeter 3 repräsentieren seit dem Jahr 2007 nunmehr den Wasserertrag unter einem anderen aufwachsenden jungen Waldbestand aus Laubgehölz (Spontanvegetation). Dies wurde durch Einführung der entsprechenden Spalten in Tabelle 9 berücksichtigt. Hieraus gehen die Jahressummen, Fünfjahressummen und Mittel sowie die Gesamtsumme und langjähriges Mittel von Niederschlag und Sickerwassermengen der einzelnen Lysimeterbecken hervor, ebenso dieselben Größen der Differenzen zwischen Niederschlag und Sickerwasser sowie zwischen Sickerwässern unter der verschiedenen Vegetation.

In der zeitlichen Entwicklung der Sickerwasserabläufe ist insbesondere in den ersten Jahren an den drei Lysimeterbecken eine deutliche Parallelität im Gang zwischen Niederschlag und Sickerwasser zu erkennen (Abbildung 38). Auch die Beträge der Sickerwassermengen sind anfangs vergleichbar und bleiben von Gras und Laubwald in den ersten zehn Jahren größenordnungsmäßig ähnlich hoch. Nach 1976 gehen die beiden Kurven auseinander. Das heißt, es fällt unter Laubwald zunehmend weniger Sickerwasser an als unter Gras. Bei dem Kiefern-Bestand ist dies schon ab dem Jahr 1969, also nach drei Jahren zu beobachten.



**Abbildung 38:** Messergebnisse von Niederschlag und Sickerwasser (N0: Niederschlag in Bodenhöhe gemessen)

Während bei den Kiefern bereits nach sechs Jahren eine relative Konstanz im größenordnungsmäßigen Niveau der Sickerwasserbeträge erreicht ist, tendieren sie beim Laubwald erst allmählich und lange anhaltend zu niedrigeren Werten. Dieser Trend scheint sich bis heute fortzusetzen. Bildete sich bis 1990 noch deutlich mehr Sickerwasser unter Laubwald, so nähert sich danach die Menge dem Niveau des Nadelwaldes. Im Jahr 2002 sind die Sickerwassermengen unter Laubwald mit 174 mm und unter Nadelwald mit 171 mm fast identisch. Danach fiel unter Laubwald noch weniger Sickerwasser an als bis zum Ende der Messungen unter Nadelwald. Das heißt, in den letzten vier Jahren der Beobachtungszeit am Nadelwald-Lysimeter wurde dort ein durchweg höherer Sickerwasseranfall gemessen als unter Laubwald, ohne dass etwa durch Hiebmaßnahmen am Nadelwald-Lysimeter wieder ein ansteigender Trend in der Sickerwassermenge zu beobachten war (s.a. Abbildung 38).

Bisher wurde davon ausgegangen, dass sich unter Laubwald mehr Grundwasser neu bildet als unter Nadelwald.

Der Sickerwasserablauf des Pionierwaldes, dessen Vegetationsentwicklung sich noch im Anfangsstadium befindet, überschreitet bis zum Jahr 2014 den Mengenwert des Gras-Lysimeters und unterschreitet diesen erstmals im Jahr 2015.

**Tabelle 9:** Jahresmengen von Niederschlag, Sickerwasser und ihrer Differenzen (N0 - S3(P) entspricht annähernd der Verdunstung)

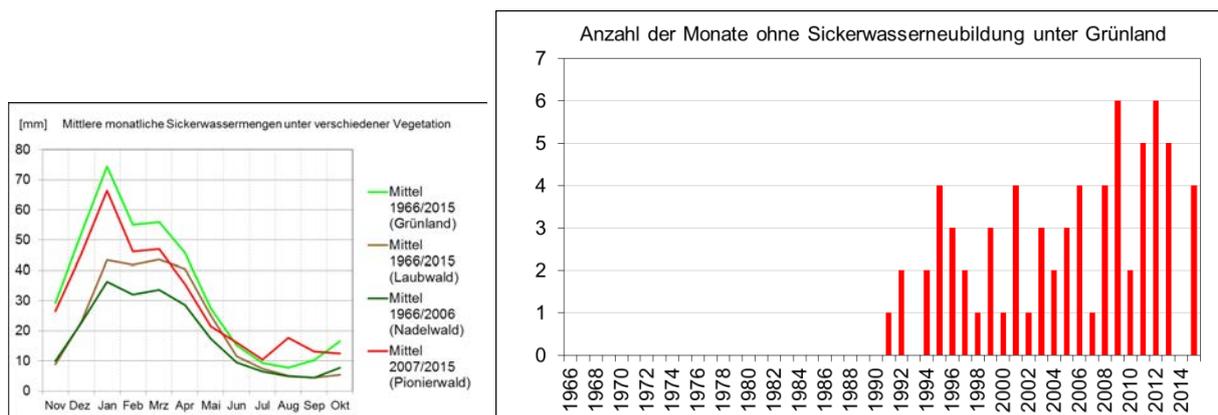
Niederschlag auf Bodengleiche (No), Sickerwasser unter Gras (S1), Laubwald (S2), Nadelwald (S3), Pionierwald (S3P) in mm/a

Abflußjahr	No	S1	S2	S3	S3P	No - S1	No - S2	No - S3	No-S3P	S1 - S2	S1 - S3	S1 - S3P
1966	1138,03	657,80	661,43	670,16		480,23	476,60	467,87		-3,63	-12,36	
1967	960,98	485,84	460,71	467,92		475,14	500,27	493,06		25,13	17,92	
1968	1006,88	596,65	542,78	485,89		410,23	464,10	520,99		53,87	110,76	
1969	675,23	363,83	359,34	310,28		311,40	315,89	364,95		4,49	53,55	
1970	871,82	377,84	395,93	271,72		493,98	475,89	600,10		-18,09	106,12	
<b>Summe 66-70</b>	<b>4652,94</b>	<b>2481,96</b>	<b>2420,19</b>	<b>2205,97</b>		<b>2170,98</b>	<b>2232,75</b>	<b>2446,97</b>		<b>61,77</b>	<b>275,99</b>	
<b>Mittelwert</b>	<b>930,59</b>	<b>496,39</b>	<b>484,04</b>	<b>441,19</b>		<b>434,20</b>	<b>446,55</b>	<b>489,39</b>		<b>12,35</b>	<b>55,20</b>	
1971	604,25	362,13	354,54	221,89		242,12	249,71	382,36		7,59	140,24	
1972	651,71	237,63	240,41	73,90		414,08	411,30	577,81		-2,78	163,73	
1973	627,73	334,54	303,42	165,51		293,19	324,31	462,22		31,12	169,03	
1974	753,65	331,16	336,30	198,71		422,49	417,35	554,94		-5,14	132,45	
1975	751,56	520,73	467,60	299,13		230,83	283,96	452,43		53,13	221,60	
<b>Summe 71-75</b>	<b>3388,90</b>	<b>1786,19</b>	<b>1702,27</b>	<b>959,14</b>		<b>1602,71</b>	<b>1686,63</b>	<b>2429,76</b>		<b>83,92</b>	<b>827,05</b>	
<b>Mittelwert</b>	<b>677,78</b>	<b>357,24</b>	<b>340,45</b>	<b>191,83</b>		<b>320,54</b>	<b>337,33</b>	<b>485,95</b>		<b>16,78</b>	<b>165,41</b>	
1976	551,44	264,17	245,27	115,86		287,27	306,17	435,58		18,90	148,31	
1977	643,88	312,75	277,44	123,13		331,13	366,44	520,75		35,31	189,62	
1978	716,28	328,49	249,13	114,78		387,79	467,15	601,50		79,36	213,71	
1979	738,12	418,64	313,18	146,69		319,48	424,94	591,43		105,46	271,95	
1980	754,53	407,82	274,30	137,16		346,71	480,23	617,37		133,52	270,66	
<b>Summe 76-80</b>	<b>3404,25</b>	<b>1731,87</b>	<b>1359,32</b>	<b>637,62</b>		<b>1672,38</b>	<b>2044,93</b>	<b>2766,63</b>		<b>372,55</b>	<b>1094,25</b>	
<b>Mittelwert</b>	<b>680,85</b>	<b>346,37</b>	<b>271,86</b>	<b>127,52</b>		<b>334,48</b>	<b>408,99</b>	<b>553,33</b>		<b>74,51</b>	<b>218,85</b>	
1981	869,33	453,53	336,58	225,79		415,80	532,75	643,54		116,95	227,74	
1982	716,46	390,50	291,69	174,14		325,96	424,77	542,32		98,81	216,36	
1983	718,52	461,89	368,29	173,62		256,63	350,23	544,90		93,60	288,27	
1984	940,99	550,38	405,84	249,82		390,61	535,15	691,17		144,54	300,56	
1985	616,98	341,86	272,33	170,67		275,12	344,65	446,31		69,53	171,19	
<b>Summe 81-85</b>	<b>3862,28</b>	<b>2198,16</b>	<b>1674,73</b>	<b>994,04</b>		<b>1664,12</b>	<b>2187,55</b>	<b>2868,24</b>		<b>523,43</b>	<b>1204,12</b>	
<b>Mittelwert</b>	<b>772,46</b>	<b>439,63</b>	<b>334,95</b>	<b>198,81</b>		<b>332,82</b>	<b>437,51</b>	<b>573,65</b>		<b>104,69</b>	<b>240,82</b>	
1986	793,92	427,21	249,22	138,34		366,71	544,70	655,58		177,99	288,87	
1987	885,63	521,62	313,42	250,25		364,01	572,21	635,38		208,20	271,37	
1988	861,34	563,45	347,18	235,32		297,89	514,16	626,02		216,27	328,13	
1989	628,43	363,27	215,72	154,82		265,16	412,71	473,61		147,55	208,45	
1990	777,11	339,22	137,43	90,17		437,89	639,68	686,94		201,79	249,05	
<b>Summe 86-90</b>	<b>3946,43</b>	<b>2214,77</b>	<b>1262,97</b>	<b>868,90</b>		<b>1731,66</b>	<b>2683,46</b>	<b>3077,53</b>		<b>951,80</b>	<b>1345,87</b>	
<b>Mittelwert</b>	<b>789,29</b>	<b>442,95</b>	<b>252,59</b>	<b>173,78</b>		<b>346,33</b>	<b>536,69</b>	<b>615,51</b>		<b>190,36</b>	<b>269,17</b>	
1991	696,04	367,37	193,34	188,63		328,67	502,70	507,41		174,03	178,74	
1992	791,26	442,08	252,24	223,59		349,18	539,02	567,67		189,84	218,49	
1993	985,65	627,94	280,97	272,97		357,71	704,68	712,68		346,97	354,97	
1994	996,08	598,42	502,71	362,63		397,66	493,37	633,45		95,71	235,79	
1995	885,09	614,60	411,55	335,84		270,49	473,54	549,25		203,05	278,76	
<b>Summe 91-95</b>	<b>4354,12</b>	<b>2650,41</b>	<b>1640,81</b>	<b>1383,66</b>		<b>1703,71</b>	<b>2713,31</b>	<b>2970,46</b>		<b>1009,60</b>	<b>1266,75</b>	
<b>Mittelwert</b>	<b>870,82</b>	<b>530,08</b>	<b>328,16</b>	<b>276,73</b>		<b>340,74</b>	<b>542,66</b>	<b>594,09</b>		<b>201,92</b>	<b>253,35</b>	
1996	573,98	113,78	0,00	0,00		460,20	573,98	573,98		113,78	113,78	
1997	724,80	372,20	186,30	130,36		352,60	538,50	594,44		185,90	241,84	
1998	1007,14	487,49	134,41	125,79		519,65	872,73	881,35		353,08	361,70	
1999	777,97	497,47	374,05	291,06		280,50	403,92	486,91		123,42	206,41	
2000	967,96	434,32	212,06	154,81		533,64	755,90	813,15		222,26	279,51	
<b>Summe 96-00</b>	<b>4051,85</b>	<b>1905,26</b>	<b>906,82</b>	<b>702,02</b>		<b>2146,59</b>	<b>3145,03</b>	<b>3349,83</b>		<b>998,44</b>	<b>1203,24</b>	
<b>Mittelwert</b>	<b>810,37</b>	<b>381,05</b>	<b>181,36</b>	<b>140,40</b>		<b>429,32</b>	<b>629,01</b>	<b>669,97</b>		<b>199,69</b>	<b>240,65</b>	
2001	790,95	397,72	139,73	111,60		393,23	651,22	679,35		257,99	286,12	
2002	958,02	430,54	173,70	171,00		527,48	784,32	787,02		256,84	259,54	
2003	765,09	392,82	159,13	211,53		372,27	605,96	553,56		233,69	181,29	
2004	870,93	353,63	164,61	182,96		517,30	706,32	687,97		189,02	170,67	
2005	792,94	383,85	131,78	180,74		409,09	661,16	612,20		252,07	203,11	
<b>Summe 01-05</b>	<b>4177,93</b>	<b>1958,56</b>	<b>768,95</b>	<b>857,83</b>		<b>2219,37</b>	<b>3408,98</b>	<b>3320,10</b>		<b>1189,61</b>	<b>1100,73</b>	
<b>Mittelwert</b>	<b>835,59</b>	<b>391,71</b>	<b>153,79</b>	<b>171,57</b>		<b>443,87</b>	<b>681,80</b>	<b>664,02</b>		<b>237,92</b>	<b>220,15</b>	
2006	697,96	298,20	82,95	141,08		399,76	615,01	556,88		215,25	157,12	
2007	963,47	402,48	156,82		491,37	560,99	806,65		472,10	245,66	-88,89	
2008	785,00	413,73	203,70		450,30	371,27	581,30		334,70	210,03	-36,57	
2009	638,42	166,88	48,97		272,09	471,54	589,45		366,33	117,91	-105,21	
2010	913,72	388,77	176,05		530,17	524,95	737,67		383,55	212,72	-141,40	
<b>Summe 06-10</b>	<b>3998,57</b>	<b>1670,06</b>	<b>668,49</b>	<b>141,08</b>		<b>1743,93</b>	<b>2328,51</b>	<b>3330,08</b>	<b>556,88</b>	<b>1556,68</b>	<b>1001,57</b>	<b>-372,07</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>799,71</b>	<b>334,01</b>	<b>133,70</b>	<b>141,08</b>		<b>435,98</b>	<b>465,70</b>	<b>666,02</b>	<b>556,88</b>	<b>389,17</b>	<b>200,31</b>	<b>-93,02</b>
2011	675,59	328,83	228,68		320,18	346,76	446,91		355,41	100,15		8,65
2012	758,31	180,18	75,87		290,34	578,13	682,44		467,97	104,31		-110,16
2013	689,42	249,02	87,18		272,94	440,40	602,24		416,48	161,84		-23,92
2014	821,77	278,69	74,55		320,07	543,08	747,22		501,70	204,14		-41,38
2015	837,22	328,51	127,80		277,37	508,71	709,42		559,85	200,71		51,14
<b>Summe 11-15</b>	<b>3782,31</b>	<b>1365,23</b>	<b>594,08</b>		<b>1480,90</b>	<b>2417,08</b>	<b>3188,23</b>		<b>2301,41</b>	<b>771,15</b>		<b>-115,67</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>756,46</b>	<b>273,05</b>	<b>118,82</b>		<b>296,18</b>	<b>483,42</b>	<b>637,65</b>		<b>460,28</b>	<b>154,23</b>		<b>-23,13</b>
<b>ges. Summe</b>	<b>39619,58</b>	<b>19962,47</b>	<b>12998,63</b>	<b>8750,26</b>		<b>3224,83</b>	<b>2328,51</b>	<b>3330,08</b>	<b>23786,40</b>	<b>3858,09</b>	<b>6963,84</b>	<b>8475,12</b>
<b>ges. Mittelwert</b>	<b>792,39</b>	<b>399,25</b>	<b>259,97</b>	<b>213,42</b>		<b>358,31</b>	<b>465,70</b>	<b>666,02</b>	<b>580,16</b>	<b>139,28</b>	<b>206,71</b>	<b>-54,19</b>

**Tabelle 10:** Mittlere monatliche, halbjährliche und jährliche Sickerwassermengen sowie statistische Kennwerte

Sickerwasser in mm	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Wi	So	Jahr
<b>Grünland</b>															
Mittel 1966/2015	29,3	52,0	74,5	55,1	56,0	45,7	27,5	15,1	9,3	7,8	10,4	16,6	312,6	86,7	399,3
Standardabweichung	37,2	37,0	39,3	26,2	29,7	21,2	13,7	12,1	11,4	10,3	18,5	27,8	100,1	58,0	118,1
Minimum	0,0	0,0	2,6	14,8	13,2	13,4	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	63,7	4,5	113,8
Maximum	148,9	151,9	177,7	113,2	145,1	106,9	59,9	62,3	51,6	40,0	84,9	133,6	570,8	249,8	657,8
Schwankungsweite	148,9	151,9	175,1	98,4	131,9	93,5	55,4	62,3	51,6	40,0	84,9	133,6	507,1	245,3	544,0
<b>Laubwald</b>															
Mittel 1966/2015	8,9	23,0	43,3	41,8	43,5	40,5	25,1	11,5	7,4	5,1	4,5	5,4	201,0	59,0	260,0
Standardabweichung	18,7	32,6	41,3	25,7	24,1	19,9	16,4	12,6	12,1	10,1	10,5	14,5	103,8	55,1	135,8
Minimum	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Maximum	91,0	136,9	145,3	98,4	102,6	91,8	64,8	56,2	52,9	44,0	62,1	82,1	476,5	220,9	661,4
Schwankungsweite	91,0	136,9	145,3	98,4	102,6	91,8	64,8	56,2	52,9	44,0	62,1	82,1	476,5	220,9	661,4
<b>Nadelwald</b>															
Mittel 1966/2006	10,0	22,5	36,3	32,1	33,6	28,5	17,4	9,4	6,5	4,9	4,4	7,8	163,0	50,4	213,4
Standardabweichung	17,7	29,8	33,2	21,5	16,7	17,2	10,1	7,5	8,8	8,4	8,9	18,0	94,5	44,2	121,5
Minimum	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Maximum	103,7	142,8	108,8	88,3	70,2	87,8	48,9	39,9	49,4	43,4	52,2	83,1	468,9	201,2	670,2
Schwankungsweite	103,7	142,8	108,8	88,3	70,2	87,8	48,9	39,9	49,4	43,4	52,2	83,1	468,9	201,2	670,2
<b>Pionierwald</b>															
Mittel 2007/2015	26,6	45,2	66,4	46,2	47,1	35,5	21,5	16,1	10,5	17,7	13,1	12,4	267,0	91,3	358,3
Standardabweichung	27,2	30,1	25,3	8,8	21,2	17,3	12,0	14,6	16,1	29,5	24,9	16,8	58,5	91,2	102,8
Minimum	0,0	2,6	24,5	32,2	19,6	15,2	7,4	3,0	0,0	0,0	0,0	0,4	212,0	11,6	272,1
Maximum	83,5	101,4	106,7	61,7	84,0	60,1	48,3	40,9	49,4	85,2	74,2	53,1	391,5	268,6	530,2
Schwankungsweite	83,5	98,8	82,2	29,5	64,4	44,9	40,9	37,9	49,4	85,2	74,2	52,7	179,5	257,0	258,1
Wi: Winterhalbjahr von November bis April, So: Sommerhalbjahr von Mai bis Oktober															

Die monatliche Verteilung des Sickerwassers lässt erkennen, dass die größten Mengen bei allen vier Vegetationsarten im Januar anfallen (Abbildung 39, links und Tabelle 10), wobei im langjährigen Mittel ein zweites und beim Laubwald gleichwertiges Maximum noch im März auftritt. Insgesamt gesehen, sind aber die Monate Dezember bis April diejenigen, in denen die größte Grundwasserneubildung stattfindet. Zum Mai hin nimmt die Menge rasch ab und erreicht ihr Minimum im Monat Juli beim aufwachsenden Pionierwald und August beim Grünland, während es bei den beiden Waldbeständen in den September fällt. Der Anstieg des Sickerwassers im August beim Pionierwald dürfte auf die erhöhte Sickerfähigkeit des gelockerten Bodens nach Starkregen zurückzuführen sein. Der Oktober bringt unter Laub- und Nadelwald nur wenig neues Grundwasser. Dagegen zeigt sich beim Grünland in diesem Monat schon wieder ein deutlicher Anstieg in der Sickerwassermenge, die sich im anschließenden November fast verdoppelt und im Dezember, wie zurzeit auch beim Pionierwald, das obere Niveau der Neubildungsrate erreicht. Dies ist auch der Monat, in dem beim Laub- und Nadelwald nach der sommerlichen und herbstlichen Niedrigphase die Sickerwasserrate wieder merklich ansteigt. Wie die Abweichung vom Mittel und die Schwankungsweite zeigen, sind die Unterschiede von Jahr zu Jahr beträchtlich. So ist sowohl unter Laub- als auch unter Nadelwald in manchen Jahren mit überhaupt keiner Grundwasserneubildung zu rechnen, wie hier im Jahr 1996, während sie bei flacher Vegetation bisher nur in den Monaten Juni bis Dezember ausblieb, maximal an sechs Monaten pro Jahr.



**Abbildung 39:** Mittlere Monatssummen der Sickerwassermenge (links), Monate ohne Sickerwasser (rechts)

Auffallend ist, dass erstmalig nach 1990 beim Grünland-Lysimeter Monate ohne Sickerwasserbildung auftraten (Abbildung 39, rechts). Mögliche Ursachen dafür könnten die Entwicklung der Grasnarbe, eine Bodenkonsolidierung sowie Auswirkungen des Klimawandels sein.

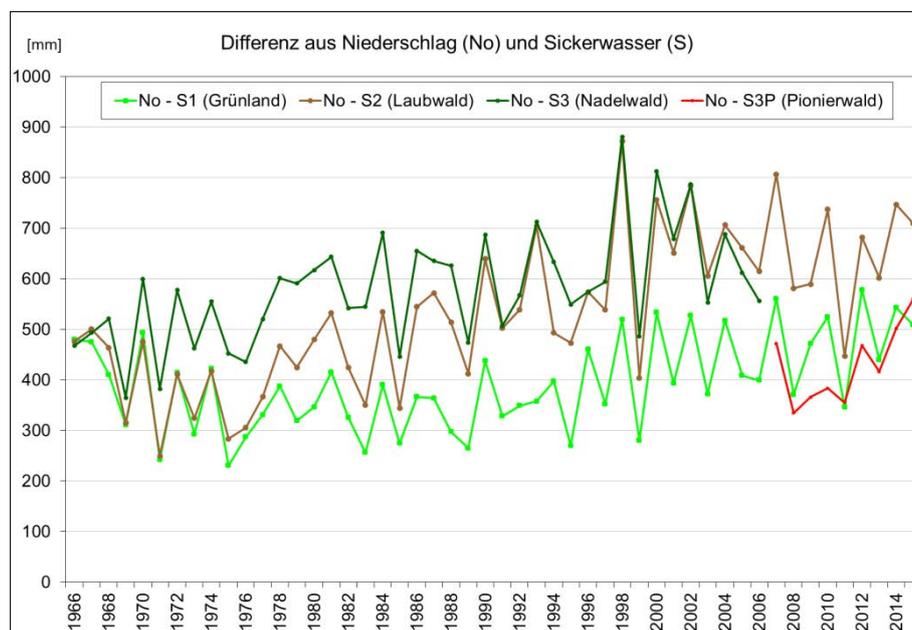
Bemerkenswert ist, dass auch in den Sommermonaten noch beträchtliche Mengen an Sickerwasser anfallen können. Generell aber ist das Winterhalbjahr die Hauptperiode der Grundwassererneuerung, die im Durchschnitt bei den verschiedenen Vegetationsarten zwischen rd. 74 und 78 % der Gesamtmenge ausmacht.

## Verdunstung

Die Differenz von Niederschlag und Sickerwasserabfluss entspricht annähernd der aktuellen Gesamtverdunstung, wenn langjährige Mittel betrachtet werden und kein Oberflächenabfluss existiert. Diese Voraussetzungen sind an der Lysimeteranlage St. Arnold in der Regel gegeben. Die Verdunstung in kürzeren Zeitperioden kann nur bei Erfassung der Bodenfeuchteänderung ermittelt werden, ist hier aber vorrangig nicht Gegenstand der Untersuchungen.

In Abbildung 40 ist die jährliche Verdunstung der Vegetationsflächen zum Vergleich einander gegenüber gestellt.

Aus Tabelle 9 können für alle vier Vegetationsarten die Beträge der aktuellen Verdunstung entnommen werden.

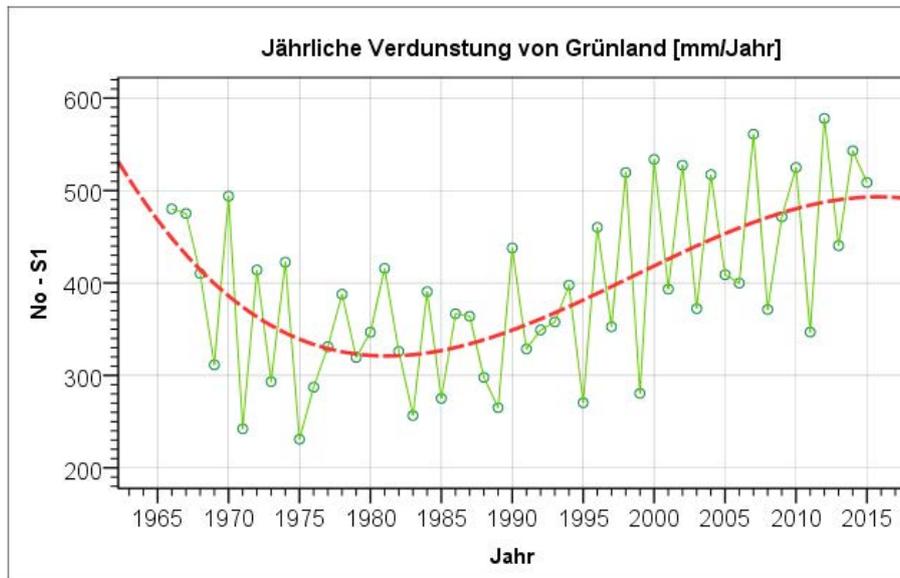


**Abbildung 40:** Jährliche Gesamtverdunstung aus Differenz zwischen Niederschlag und Sickerwasser

Im Folgenden zu den Vegetationsarten:

### Grünland

Die Verdunstung von Grünland beträgt im langjährigen Mittel 393 mm/Jahr und liegt somit 13 mm über dem gerundeten Wert von 380 mm, was dem Wert entspricht, der aus den bisherigen Lysimetermessungen abgeleitet und häufig für wasserwirtschaftliche Planungen angesetzt wurde (SCHROEDER & WYRWICH 1990). Die höheren Werte in der ersten Pentade können mit häufig hohen Niederschlägen und in der Zeitspanne seit 1996 (Verdunstungsmittel 456 mm/Jahr) mit vermehrt auftretenden Starkregen einhergegangen sein (s. Kapitel 3.1.1.6, Abbildung 34 und Abbildung 37).



**Abbildung 41:** Entwicklung der jährlichen Verdunstung Grünland

Vor allem ab 1990 zeigt sich ein deutlicher Anstieg in der Verdunstung (Abbildung 41). Dass dies gerade beim Gras-Lysimeter der Fall ist, deutet auf Einwirkungen der Klimaveränderung hin. Hier suggeriert die rote Anpassungslinie einen Wendepunkt bei etwa 490 mm, ein Wert, der für ein Verdunstungsmittel von Gras sicherlich zu hoch ist. Stattdessen wäre ein Wert für niedrige Dauervegetation von 430 mm realistisch, der etwa dem Mittel der Zeitreihe 1991 – 2015 entspricht, in der die Jahre mit Monaten ohne Sickerwasserabfluss auftreten, womit so auch die veränderten Klimabedingungen berücksichtigt wären.

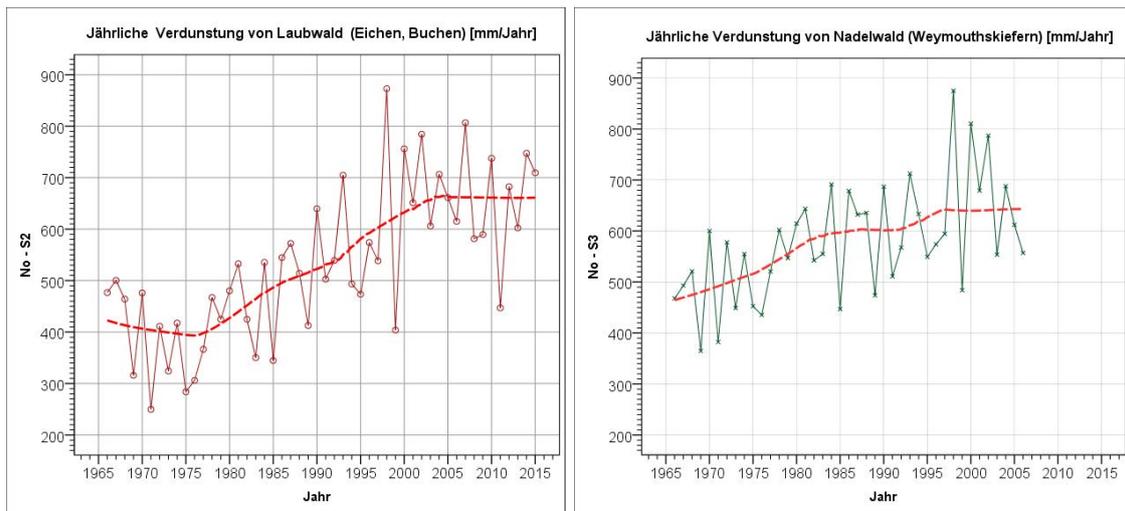
### Laubwald

Die Verdunstung des Laubwaldes ist in den ersten zehn Jahren ähnlich oder nur geringfügig höher als bei Grünland. Nach 1976 ist eine deutliche Steigerung zu erkennen, die bis 1998 anhält, um dann auf einem höheren Niveau, im Mittel bei 652 mm/a zu verweilen (Abbildung 40). Für das langjährige Mittel ergibt sich ein jährlicher Verdunstungsbetrag von 532 mm. Dieser kann größenordnungsmäßig durchaus für einen großen Teil der Laubholz-Flächen als repräsentativ angesehen werden. So ergibt sich aus der 21jährigen Messreihe 1995/2015 (Tensiometer) im Rahmen des forstlichen Umweltmonitorings in NRW an einem Buchenbestand in der Haard ebenfalls auf sandigem Boden ein Jahresmittel der Verdunstung von 538 mm (GEHRMANN 2016). Die Ergebnisse dieser aktuellen Auswertungen liegen jetzt über den von SCHROEDER & WYRWICH (1990) angegebenen 480 mm und reichen an den Wert von 540 mm heran, den bereits SCHROEDER (1992) als bestandstypisch vermutete. Die darüber hinaus steigende Verdunstung kann als Anzeichen des Klimawandels infolge der steigenden Temperaturen interpretiert werden.

So deutet die Anpassungslinie in Abbildung 42 (rechts) an, dass beim Laubwald um 1990 bereits eine Wende zu konstanteren Verdunstungswerten eingeleitet wurde (Knick bei 540 mm), welche aber durch die allgemeine Verdunstungszunahme überlagert werden, so dass sich eine Konstanz in der mittleren Verdunstung erst nach dem Jahr 2003 einstellt.

## Nadelwald

Die Ganglinie der Kiefern-Verdunstung zeigt im Prinzip ein ähnliches, aber etwas abgeschwächtes Verhalten. Jedoch ist bereits nach den ersten drei Jahren eine erhebliche Steigerung der Verdunstung zu verzeichnen. Danach folgt eine Phase ohne erkennbaren Trend bis etwa 1977, die dann ebenfalls von einer Zunahme der Verdunstung abgelöst wird, die bis 1984 andauert. Danach pendeln sich die Beträge auf ein Mittel von etwa 600 mm ein. Ab 1998 gibt es einige starke Anstiege in den Verdunstungsbeträgen, so dass sich daraus ein Mittel von 673 mm ergibt. Insgesamt ergibt sich unter Einbeziehung der Aufwuchsphase ein langjähriges Mittel von 580 mm (Tabelle 9), der dem von SCHROEDER & WYRWICH (1990) abgeleiteten Wert (600 mm) gut entspricht.



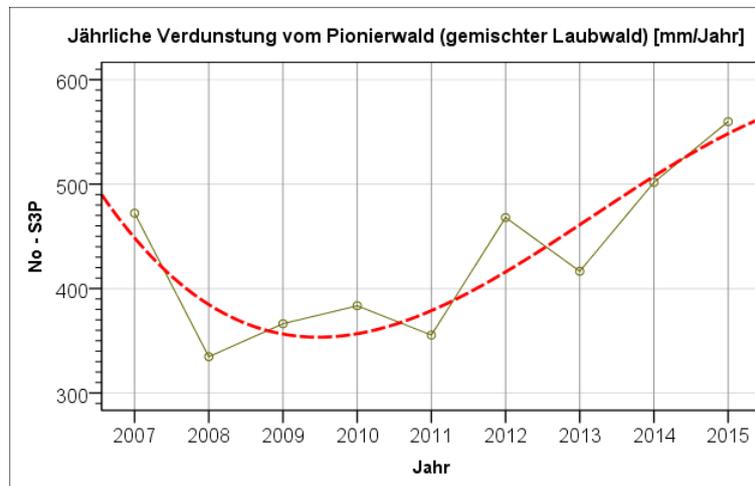
**Abbildung 42:** Entwicklung der jährlichen Verdunstung bei Laubwald (links), Entwicklung der jährlichen Verdunstung bei Nadelwald (rechts)

Für geschlossene Altbestände bei Laub- und Nadelwald ohne Einbeziehung der Aufwuchsphase hingegen ist von höheren Verdunstungsbeträgen auszugehen.

Die Abbildung 42 (links und rechts) zeigen, dass in den letzten Jahren gegen Ende der Aufwuchsphase die jährliche Verdunstung um einen konstanten Wert pendelt, der durch die rote Anpassungslinie bestimmt wird (trichotomische Funktion). Er liegt beim Nadelwald seit 1998 bei 640 mm, beim Laubwald seit 2004 bei 660 mm. Danach kann für Laub- und Nadelwald-Altbestände gleichermaßen in etwa eine pauschale Verdunstung von ca. 650 mm/Jahr angesetzt werden.

Pionierwald:

Die Abbildung 43 zeigt beim Pionierwald während seiner Aufwuchsphase die zunehmende Verdunstung, die im Jahr 2015 nach neun Jahren immerhin schon einen Wert von 560 mm erreicht hat. Danach scheint sich gemäß der Regressionslinie (kubisch) eine Wendung zu allmählich konstanteren Verdunstungsbeträgen anzubahnen.



**Abbildung 43:** Entwicklung der jährlichen Verdunstung bei Pionierwald

Die Verdunstung im Mittel für den Pionierwald bis zu einem neunjährigen Aufwuchsstadium ergibt sich zu 429 mm jährlich, eine Größenordnung, wie sie den Erwartungen für solche aufwachsenden Bestände auf dafür hergerichteten Flächen entspricht.

### **Vergleich der verschiedenen Vegetationstypen hinsichtlich der Sickerwassermengen gemäß Tabelle 9**

Differenzen zwischen den Sickerwasserablaufmengen der verschiedenen Vegetationsarten untereinander erlauben eine Aussage über die Mehrverdunstung bzw. Mindergrundwasserneubildung (oder umgekehrt) dieser jeweiligen Vegetationsarten, deren Beträge sich häufig auf andere Standorte mit unterschiedlichen Bedingungen, z.B. Bodenart, Klima, übertragen lassen, um dort die gesuchte Verdunstung oder Grundwasserneubildung abschätzen zu können. Diese Differenzbeträge zwischen Grünland und Laubwald, Grünland und Nadelwald sowie Grünland und Pionierwald gehen aus Tabelle 9 hervor.

## Interzeption

Einen wesentlichen Anteil der Gesamtverdunstung macht bei großwüchsiger Vegetation die Interzeptionsverdunstung aus, also die Verdunstung des von den Pflanzen zurückgehaltenen Niederschlags. Sie ergibt sich als Differenz zwischen Freilandniederschlag und Bestandsniederschlag. Letzterer ist die Summe von dem durch die Baumkronen tropfenden Niederschlag und dem Stammablauf. Die dazugehörigen Messeinrichtungen sind in Kapitel 2.3 beschrieben. Ganzjährig vollständige Messreihen gibt es nur im Zeitraum 1984 – 1990 sowie etwas aktuellere Werte aus 2003 und 2004. Sie gehen aus folgender Tabelle hervor.

**Tabelle 11:** Jahressummen in mm von Freiland-, durchtropfendem, stammablaufendem Niederschlag sowie Interzeption für den Laub- und Nadelwaldbestand

Abflussjahr	Eichen-Buchen					Weymouthskiefern			
	Freilandniederschlag	durchtropfender Niederschlag	Stammablauf	Bestandsniederschlag	Interzeption	durchtropfender Niederschlag	Stammablauf	Bestandsniederschlag	Interzeption
1984	941,0	790,0	72,0	862,0	79,0	594,0	64,0	658,0	283,0
1985	617,6	487,0	25,0	512,0	105,6	310,0	33,0	343,0	274,6
1986	817,0	640,0	40,0	680,0	137,0	412,0	52,0	464,0	353,0
1987	882,4	681,0	56,0	737,0	145,4	530,0	72,0	602,0	280,4
1988	871,0	695,0	39,0	734,0	137,0	480,0	69,0	549,0	322,0
1989	628,5	501,0	23,0	524,0	104,5	376,0	42,0	418,0	210,5
1990	777,1	634,0	37,0	671,0	106,1	507,0	61,0	568,0	209,1
2003	765,1	486,4	17,6	504,0	261,1	404,4	28,3	432,7	332,4
2004	870,9	644,0	23,8	667,8	203,1	524,8	43,2	568,0	302,9
Mittel	796,7	617,6	37,0	654,6	142,1	459,8	51,6	511,4	285,3
Mittel 1984/90	790,7	632,6	41,7	674,3	116,4	458,4	56,1	514,6	276,1
Mittel 2003/04	818,0	565,2	20,7	585,9	232,1	464,6	35,8	500,4	317,7

Im Mittel der neun Jahre ergibt sich ein Freilandniederschlag von 797 mm, der größenordnungsmäßig ungefähr dem langjährigen Durchschnitt entspricht. Der durch die Baumkronen hindurch tropfende Anteil davon beträgt bei dem Eichen-Buchenbestand noch 618 mm, also rd. 78 %, während zusätzlich von den Stämmen nur 37 mm bzw. knapp 5 % ablaufen, so dass daraus ein Bestandsniederschlag von rd. 655 mm resultiert. Damit gelangen noch rund 82 % des Niederschlags auf den Waldboden. Die sich daraus ergebende Interzeption beträgt

142 mm oder 18 % vom Freilandniederschlag. Der Freilandniederschlag liegt in der älteren Jahresreihe 1984/90 um nur 6 mm, die Interzeption jedoch um 26 mm niedriger, ein Zeichen für das noch nicht abgeschlossene Wachstum der Eichen und Buchen. Noch deutlicher wird dies im Vergleich zum Mittel 2003/04. Zwar liegt der Bestandsniederschlag in diesen beiden Jahren mit 818 mm um 28 mm höher als im langjährigen Mittel bzw. in der Zeitreihe 1984/90, aber die Interzeption übersteigt den Betrag dieser Zeitreihe mit 116 mm um 100 % und liegt dann bei 232 mm bzw. 28 %, bezogen auf den Freilandniederschlag (Tabelle 11), wiederum ein Anzeichen für den sich bis 2004 noch kräftig weiter entwickelten Laubwaldbestand. Anders dagegen bei den Weymouthskiefern. Hier liegt im Vergleich mit der Zeitreihe 1984/90 die mittlere Interzeption der Jahre 2003/04 nur um 42 mm höher, also eine bei Weitem geringere Zunahme, worin sich das Ende der Entwicklungsphase der Kiefern widerspiegelt. Bis dahin jedoch lag die Interzeption bei den Kiefern deutlich höher als bei den Eichen und Buchen (Tabelle 11) und betrug zeitweise mehr als das Doppelte der Laubwald-Interzeption, was bezogen auf den Freilandniederschlag im Mittel zwischen 35 und 39 % ausmacht.

Entsprechend geringer fällt der Bestandsniederschlag aus, der um 500 mm schwankt (Tabelle 11). Somit erreichen hier nur zwischen 61 und 65 % des Niederschlags den Boden, wobei jedoch mehr als beim Laubwald am Stamm herunterfließt und zwar im Mittel ca. 52 mm bzw. rd. 7 %. Auffallend ist, dass sich diese Menge bei beiden Waldbeständen in den Jahren 2003/04 trotz des etwas höheren Niederschlags deutlich reduziert hat. Dies war auch bei der durchtropfenden Niederschlagsmenge beim Laubwald zu beobachten, nicht jedoch bei den Weymouthskiefern. Hier blieb sie im Mittel zwischen 458 und 465 mm bzw. 57 und 58 % ziemlich konstant und liegt damit deutlich unter der Menge von den Eichen und Buchen. Hier scheint sich hinsichtlich der zuvor aufgeführten Komponenten eine Annäherung an den Kiefernbestand anzubahnen, was auf eine noch nicht abgeschlossene Entwicklung der Laubbäume schließen lässt.

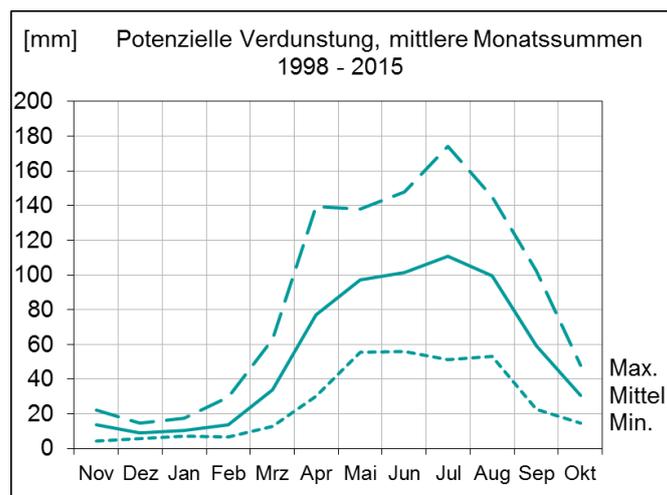
### **Potenzielle Verdunstung**

Neben den Messungen der tatsächlichen Verdunstung an den Lysimetern wird auch die potenzielle (bei ausreichend Wasser größtmögliche) Verdunstung nach einem Verfahren in Anlehnung an HAUDE (1954, 1955) ermittelt (siehe dazu auch DVWK 1996). Die Berechnung erfolgt automatisiert seit 1. November 1997 aus den Parametern Lufttemperatur, Luftfeuchte und einem vegetations- (hier Gras) und jahreszeitabhängigen Faktor. Die Ergebnisse sind als Näherungswerte zur groben Orientierung zu verstehen. Aus folgender Tabelle (Tabelle 12) gehen die aus den Tageswerten berechneten mittleren Monats-, Halbjahres und Jahressummen der 18jährigen Messreihe hervor.

Der Juli mit 111 mm und einem Maximum von 174 mm erweist sich als verdunstungsintensivster Monat und hebt sich damit klar innerhalb der Sommermonate hervor, in denen die mittleren Verdunstungsbeträge noch um die 100 mm liegen.

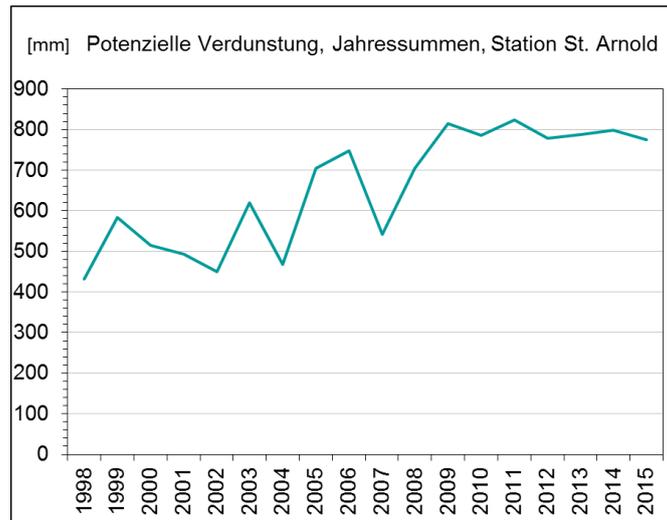
**Tabelle 12:** Mittlere Monats-, Halbjahres- und Jahressummen der potenziellen Verdunstung in mm sowie statistische Kennwerte

	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Wi	Jahr
Mittel 1998/2015	13,7	9,1	10,7	13,8	33,9	77,0	158,2	656,9
Standardabweichung	5,0	2,5	2,8	5,1	12,4	31,3	44,7	142,3
Max. 1998/2015	22,4	14,5	17,3	29,8	62,9	139,3	239,0	823,2
Min. 1998/2015	4,2	5,6	7,1	6,5	12,9	30,2	99,3	431,4
Schwankungsweite	18,2	8,9	10,2	23,3	50,0	109,1	139,7	391,8
	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	So	Jahr
Mittel 1998/2015	97,4	101,3	110,6	99,4	59,3	30,7	498,7	656,9
Standardabweichung	26,0	27,9	39,0	27,2	21,8	9,8	120,3	142,3
Max. 1998/2015	137,9	147,8	174,1	145,1	102,2	47,8	627,0	823,2
Min. 1998/2015	55,6	56,0	51,5	53,1	22,5	14,4	303,4	431,4
Schwankungsweite	82,3	91,8	122,6	92,0	79,7	33,4	323,6	391,8

**Abbildung 44:** Jahresgang der potenziellen Verdunstung im Monatsmittel der Wasserwirtschaftsjahre von 1998 bis 2015

Hier sind auch die Schwankungsweiten wie im April hoch, die die Größenordnung der mittleren Verdunstungssumme eines Sommermonats erreichen. Von September an mit Ausnahme einiger extremer Jahre nehmen die Beträge dann deutlich ab und fallen auf ihre niedrigsten Werte im November und Dezember (Abbildung 44).

In allen Monaten bestimmter Jahre gab es Tage, an denen keine Verdunstung zu verzeichnen war oder diese nur 0,1 mm betrug. Ebenso fielen die Tage mit der höchsten berechneten Verdunstung von 7 mm/Tag in die Monate April bis September.



**Abbildung 45:** Jährliche potenzielle Verdunstung von 1998 bis 2015

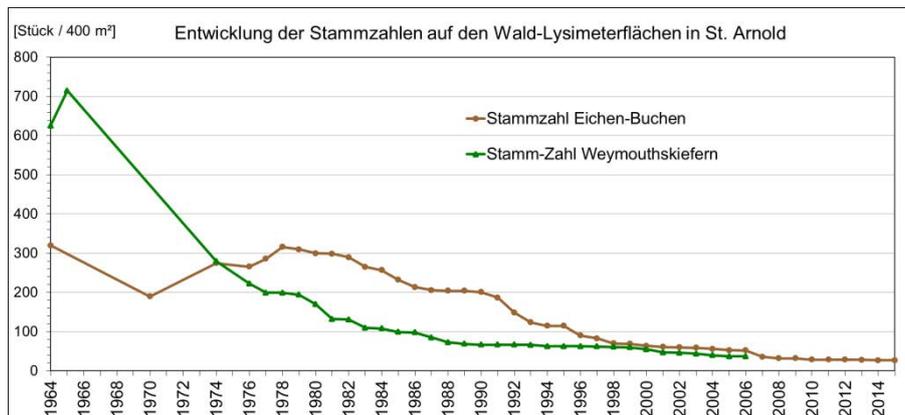
Die jährliche Verdunstung liegt hier etwa in der Höhe der Waldverdunstung. Die tendenzielle Zunahme der Verdunstung (Abbildung 45) weist Ähnlichkeit zu der Gras-Verdunstung in Abbildung 41 auf. Die potenzielle Verdunstung liegt dabei um ca. 200 mm/Jahr über der effektiven Verdunstung.

### 3.1.2.2 Baumbestand-Zuwachsmessungen

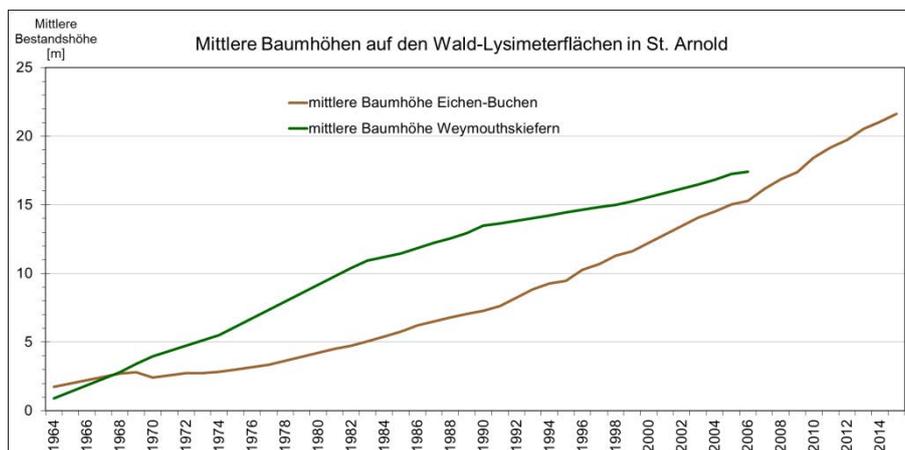
Durch die Messungen der Baumparameter werden Daten über den Zustand der Bäume auf den Lysimetern gewonnen, welcher mit den Sickerwasserabläufen in Beziehung gebracht werden kann, wodurch sich Vergleichsmöglichkeiten zu anderen Waldbeständen ergeben. Dasselbe gilt auch für Baumbestand-Parameter, wie hier die Stammzahl.

Die Erstpflanzung auf der Lysimeterfläche 2 erfolgte am 15. September 1964 zu den vorhandenen Pflanzen als Laubwald-Buntmischung mit 275 Stück Pflanzenbesatz aus 12 Arten. Im April 1970 begann eine Neuanpflanzung von 130 Stieleichen und 60 Rotbuchen zu einem praxisnäheren und vereinheitlichten Bestand, in den Diagrammen der Abbildung 46 und Abbildung 47, erkennbar an der Verringerung der Stammzahl und dem leichten Einbruch der durchschnittlichen Bestandshöhe auf 2,42 m, die die Neupflanzen Ende Oktober nach der anfänglichen Pflanzgröße von durchschnittlich 2,25 m erreichten. Am 22. Dezember 1972 wurden 80 Stieleichen und am 25. Oktober 1973 nochmal 60 Stieleichen nachgepflanzt, so dass die mittlere Bestandshöhe auf dem immer noch geringen Niveau von 2,75 m verblieb. Um den 20. Dezember 1977 und den 15. November 1978 fanden noch zwei weitere Nachpflanzungen von jeweils 20 und 30 Stück Stieleichen statt, um die meist durch Trockenschäden bedingten Verluste von überwiegend Rotbuchen auszugleichen. Daher blieb die mittlere Bestandshöhe mit 3,35 m weiter relativ niedrig. Erst danach erholte sich der Wald, so dass die Bestandshöhe stärker zunahm (Abbildung 47) und im Jahr 2015 schließlich 21,63 m erreichte. Die Verringerung der Stammzahl bis zuletzt auf 27 vollzog sich überwiegend durch natürliche Verdrängung von wuchsschwächeren Bäumen durch kräftigere benachbarte Stämme.

Beim Nadelwald-Lysimeter (Fläche 3) erfolgte die Erstpflanzung schon am 6. September 1964. Sie bestand aus 440 Stück Kiefern, 95 Fichten und 90 Tannen. Im darauffolgenden Jahr wurden 45 Stück Fichten und dieselbe Anzahl Kiefern nachgepflanzt. Nach einer Durchforstung im Dezember 1972 im Zuge der Bestandsvereinheitlichung entwickelte sich bei zuerst überdurchschnittlich gutem Zuwachs ein reiner Kiefernwald, der bis zur Vernichtung durch den Sturm Kyrill im Januar 2007 eine Höhe von 17,6 m erlangte (Abbildung 47). Die Stammzahl von anfänglich 715 nahm bis 1988 relativ rasch ab aufgrund regelmäßiger Hiebmaßnahmen und einer Durchforstung in den Jahren 1985 und 1987 sowie der Beseitigung einiger kranker Bäume (Blasenrostbefall) in 1984 und 1986. Zuletzt waren noch 37 Stämme vorhanden.



**Abbildung 46:** Entwicklung der Stammzahlen auf den Lysimeterflächen 2 (Eichen-Buchen) und 3 (Weymouthskiefern)

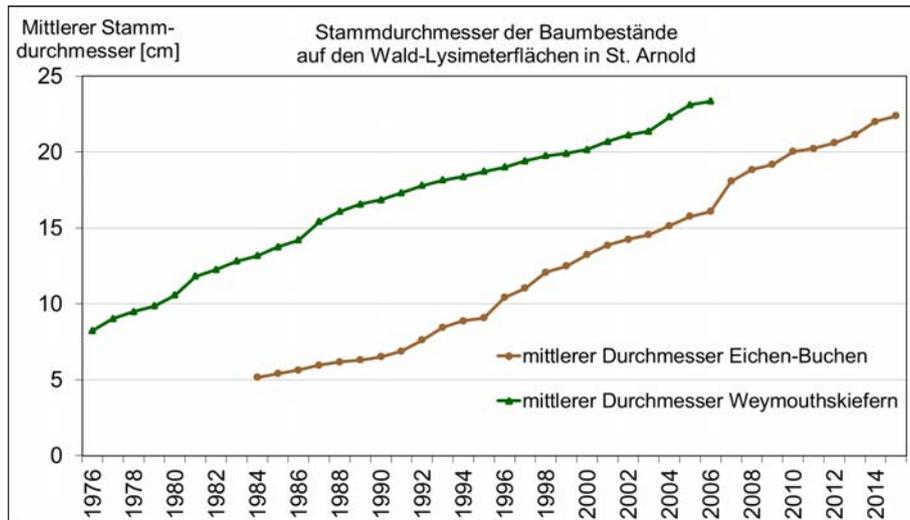


**Abbildung 47:** Entwicklung der Baumhöhen auf den Lysimeterflächen 2 (Eichen-Buchen) und 3 (Weymouthskiefern)

**Tabelle 13:** Entwicklung der Baumbestände auf den Lysimeterflächen in St. Arnold

Eichen - Buchen							Weymouthskiefern					
Jahr	Stamm-Zahl	Ände-rung	mittlere Baumhöhe	Ände-rung	mittlerer Durchmesser	Zuwachs	Stamm-Zahl	Ände-rung	mittlere Baumhöhe	Ände-rung	mittlerer Durchmesser	Zuwachs
Winter	Stück	Stück	m	m	cm	cm	Stück	Stück	m	m	cm	cm
1964	320		1,75		*		625		0,90		*	
1965			*		*		715	90	*		*	
1966			*		*				*		*	
1967			*		*				*		*	
1968			2,70		*				2,80		*	
1969			2,80		*				3,40		*	
1970	190		2,42		*				3,95		*	
1971			*		*				*		*	
1972			2,75		*				*		*	
1973			2,75		*				*		*	
1974	275		2,83		*		280		5,50		*	
1975			3,00		*				*		*	
1976	266	(-9)	*		*		223	(-57)	*		8,23	
1977	286	20	3,35		*		199	-24	*		9,02	0,79
1978	316	30	*		*		199	0	*		9,48	0,46
1979	310	-6	*		*		194	-5	*		9,85	0,37
1980	300	-10	*		*		170	-24	*		10,57	0,72
1981	299	-1	4,50		*		132	-38	*		11,80	1,23
1982	290	-9	4,75	0,25	*		131	-1	10,40		12,26	0,46
1983	265	-25	5,05	0,30	*		110	-21	10,95	0,55	12,80	0,54
1984	257	-8	5,40	0,35	5,15	0,27	108	-2	11,2	0,25	13,16	0,36
1985	232	-25	5,75	0,35	5,41	0,26	99	-9	11,45	0,25	13,74	0,58
1986	214	-18	6,20	0,45	5,64	0,23	98	-1	11,85	0,40	14,20	0,46
1987	206	-8	6,50	0,30	5,95	0,31	85	-13	12,22	0,37	15,40	1,20
1988	204	-2	6,80	0,30	6,17	0,22	73	-12	12,54	0,32	16,08	0,68
1989	204	0	7,05	0,25	6,30	0,13	69	-4	12,93	0,39	16,55	0,47
1990	201	-3	7,28	0,23	6,50	0,20	67	-2	13,49	0,56	16,84	0,29
1991	187	-14	7,64	0,36	6,87	0,37	67	0	13,66	0,17	17,31	0,47
1992	149	-38	8,25	0,61	7,61	0,74	67	0	13,85	0,19	17,78	0,47
1993	124	-25	8,86	0,61	8,44	0,83	66	-1	14,03	0,18	18,14	0,36
1994	115	-9	9,27	0,41	8,87	0,43	63	-3	14,24	0,21	18,38	0,24
1995	115	0	9,46	0,19	9,06	0,19	63	0	14,44	0,20	18,72	0,34
1996	90	-25	10,28	0,82	10,42	1,36	63	0	14,63	0,19	19,00	0,28
1997	83	-7	10,70	0,42	11,03	0,61	62	-1	14,84	0,21	19,40	0,40
1998	70	-13	11,31	0,61	12,07	1,04	61	-1	15	0,16	19,74	0,34
1999	69	-1	11,61	0,30	12,48	0,41	60	-1	15,25	0,25	19,91	0,17
2000	64	-5	*		13,24	0,76	55	-5	*		20,15	0,24
2001	61	-3	*		13,85	0,61	47	-8	*		20,68	0,53
2002	60	-1	*		14,25	0,40	46	-1	*		21,12	0,44
2003	59	-1	14,05	2,44	14,54	0,29	44	-3	16,47	1,22	21,37	0,25
2004	56	-3	14,50	0,45	15,13	0,59	40	-3	16,83	0,36	22,31	0,94
2005	53	-3	15,04	0,54	15,76	0,63	37	-3	17,26	0,43	23,10	0,79
2006	52	-1	15,30	0,26	16,08	0,32	37	0	17,41	0,15	23,34	0,24
2007	36	-16	16,16	0,86	18,07	1,99	Nadelwald am 18. und 19.1.2007 durch Sturm Kyrill zerstört					
2008	32	-4	16,86	0,70	18,84	0,77	* keine Messung					
2009	32	0	17,37	0,51	19,18	0,34						
2010	29	-3	18,44	1,07	20,02	0,84						
2011	29	0	19,18	0,74	20,22	0,20						
2012	29	0	19,74	0,56	20,59	0,37						
2013	28	-1	20,54	0,80	21,13	0,54						
2014	27	-1	21,06	0,52	22,00	0,87						
2015	27	0	21,63	0,57	22,38	0,38						

Für eine quantitative Beschreibung der Waldentwicklung und Bestimmung der Zuwächse werden seit 1976 regelmäßig nach Ende eines Wasserwirtschaftsjahres auf den beiden Lysimeterflächen die Anzahl der lebenden Stämme und die Baumhöhen festgestellt. Sie gelten für die vorangegangene Vegetationsperiode. Dazu kommen noch Messungen der Brusthöhendurchmesser der Stämme (s.a. Kapitel 2.3). Diese Messungen wurden bei den Kiefern seit September 1976, bei den Eichen-Buchen werden sie erst seit 1984 durchgeführt. In der Zeit davor gab es nur vereinzelte Aufzeichnungen. Die Ergebnisse gehen aus der Tabelle 13 und den Abbildung 46 bis Abbildung 48 hervor.

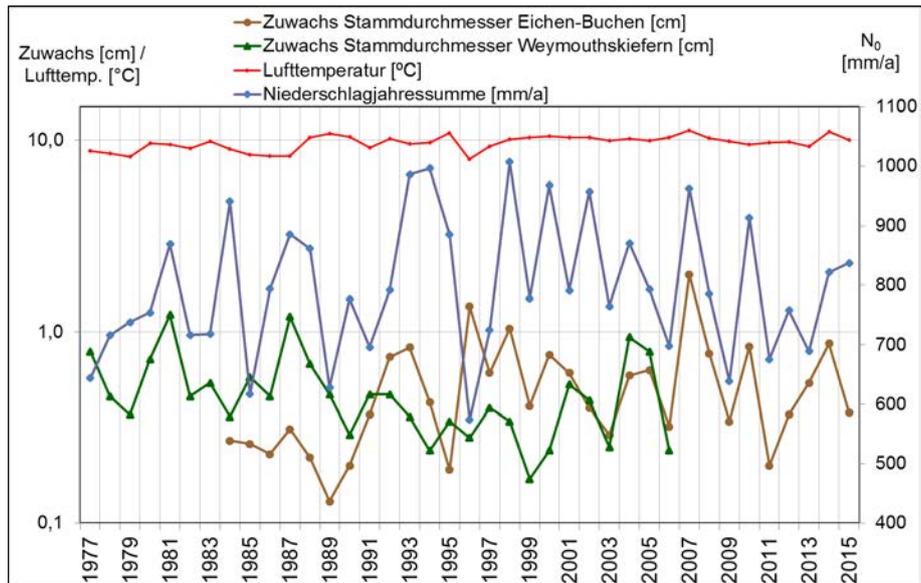


**Abbildung 48:** Entwicklung der Stammdurchmesser der Waldbestände auf den Lysimeterflächen 2 (Eichen-Buchen) und 3 (Weymouthskiefern)

Demnach ist bei den Kiefern seit 1972 nach der Bestandsvereinheitlichung ein ziemlich gleichmäßiges Jahreshöhenwachstum bis 1983 zu erkennen mit einer überdurchschnittlichen Rate von etwa 60 cm. Von da an verringerte sie sich bis 1990 auf 36 cm jährlich und bis 2005 nochmals auf 25 cm. Bis zum Ende des Kiefernbestandes Anfang 2007 sank der Wert auf 15 cm pro Jahr ab.

Anders ist der Verlauf bei den Eichen-Buchen. Hier hat seit den Nachpflanzungen im Jahr 1978 die mittlere Bestandshöhe von ca. 4 m auf 7,64 m bis zum Jahr 1991 zugenommen, was einer jährlichen und nur geringen Zuwachsrate von 28 cm entspricht. Danach aber steigerte sie sich bis zum Jahr 2005 auf einen Wert von durchschnittlich 53 cm und anschließend bis 2015 sogar auf 66 cm.

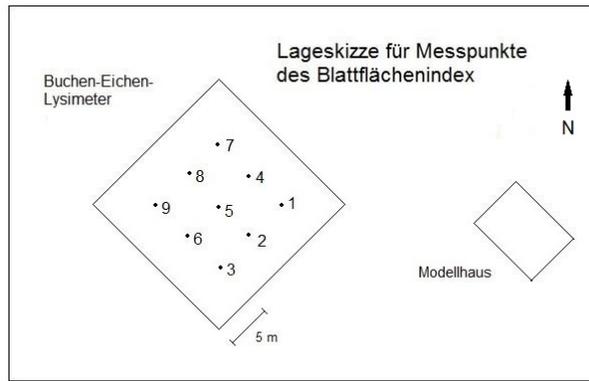
Der Brusthöhenzuwachs verläuft bei beiden Waldbeständen ebenfalls leicht entgegengesetzt (Abbildung 48). Er liegt im Durchschnitt bei den Eichen-Buchen und Weymouthskiefern mit 0,55 und 0,5 cm in etwa ähnlicher Größenordnung. In einigen Jahren treten erhöhte Zuwächse auf, so bei den Eichen-Buchen insbesondere in 1996 und 1998 von 1,36 und 1,04 cm und in 2007 mit einem Höchstwert von 1,99 cm. Ansonsten liegt der Dickenzuwachs häufig auch unter 0,5 cm. Bei den Kiefern fallen Zuwächse vor allem in den Jahren 1981 und 1987 von 1,23 und 1,20 cm und auch in 2004 mit knapp 1 cm auf.



**Abbildung 49:** Jährliche Stammzuwächse von Eichen-Buchen und Weymouthskiefern, dargestellt zusammen mit der jährlichen Niederschlagssumme und Lufttemperaturmittel

Wie aus der Abbildung 49 zu entnehmen, sind für das stärkere Dickenwachstum nicht nur allein höhere Niederschläge und Lufttemperaturen verantwortlich, sondern es spielen dabei auch andere Gründe eine Rolle, wie zunehmender Standraum und Astreinigung.

Ein wichtiger Parameter zur Beschreibung der Struktur von Baumbeständen und für Modellrechnungen ist der Blattflächenindex. Er ist das Verhältnis der Summe der Blattflächen zur überdeckten Bodenfläche. Von ihm hängt die Interzeption ab, die mit steigendem Blattflächenindex zunimmt. Der Blattflächenindex, der zwischen  $<1$  und  $>1$  liegen kann, wird direkt durch Auszählen der Blätter oder indirekt durch Messung des Lichtprofils bestimmt. Nach Kronenschluss seit etwa 1990 wurde auf dem Laubwald-Lysimeter im Sommer 1999 mittels Lichtprofilmessung der Blattflächenindex an einer Eiche mit 3,8 und an einer Buche mit 4,5 bestimmt sowie durch Laubstreuerausählung auf  $0,5 \times 0,5$  m im November mit 4,4 bis 5 (KLEIN 2000) bestimmt. Am 28. Juli 2016 wurde der Blattflächenindex auf dem Laubwald-Lysimeter diesmal an neun Messpunkten (Abbildung 50) durch Lichtprofilmessungen mit dem Solariscope SOL 300 der Firma Behling, Wedemark bestimmt. Das Ergebnis zeigt die Tabelle 14 (Schwerpunktaufgabe Waldbau und Forstvermehrungsgut, Lehr- und Versuchsforstamt Arnsberger Wald, Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen 2016). Die Messungen sollen wiederholt werden.



**Abbildung 50:** Messpunkte zur Bestimmung des Blattflächenindex

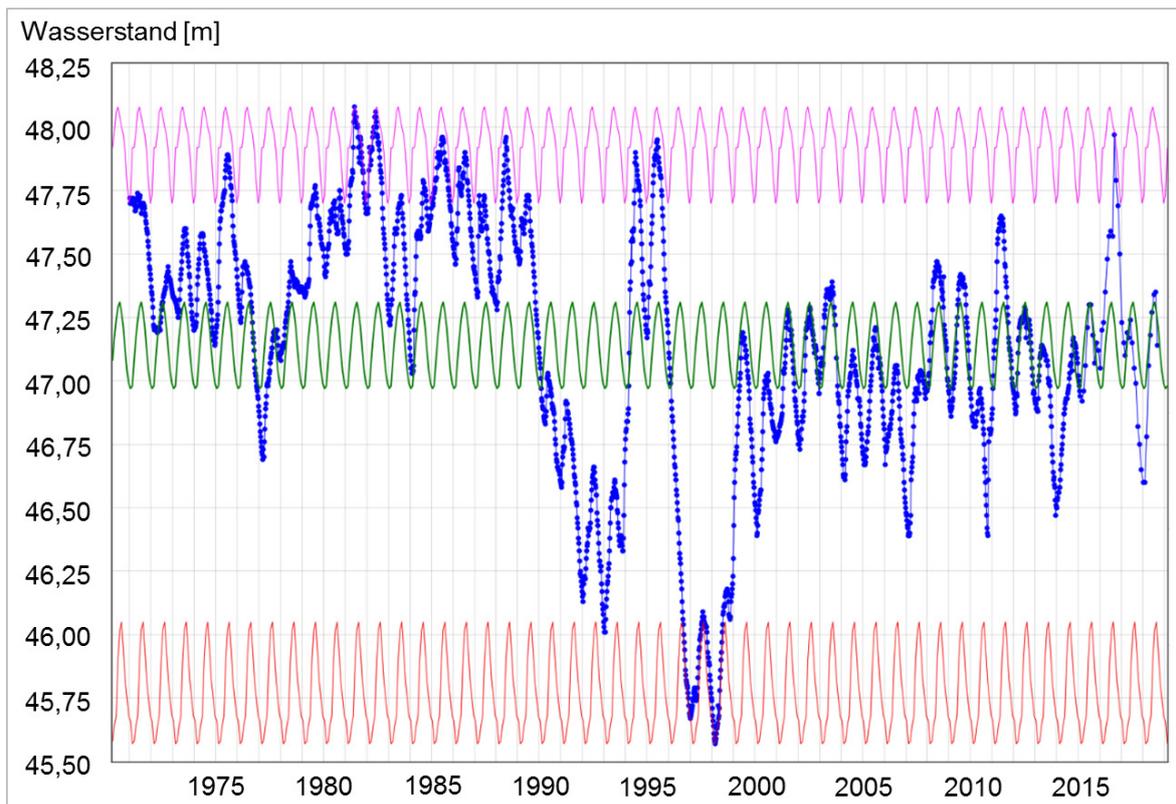
**Tabelle 14:** Messergebnisse des Blattflächenindex

Messpunkt	Blattflächenindex
1	3,4
2	2,8
3	3,6
4	2,1
5	2,5
6	3,8
7	4,0
8	3,1
9	3,9
Mittel	3,3

### 3.1.3 Grundwassergang im Bereich der Lysimeteranlage

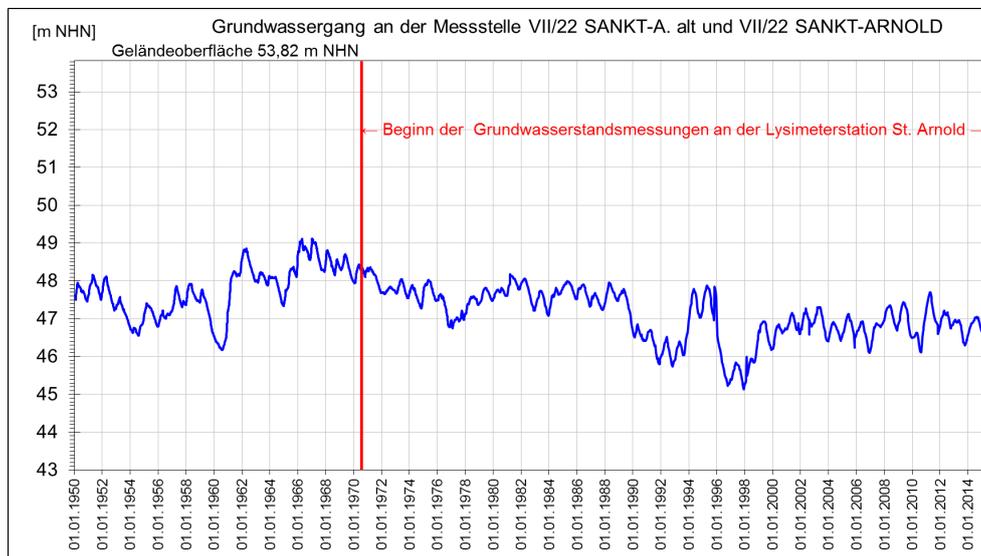
Das Sickerwasser, als Ablauf an den Lysimetern gemessen, bewirkt im natürlichen Boden ein Ansteigen der Grundwasseroberfläche, messbar an Grundwassermessstellen. Daher sollen mit Hilfe von Messaufzeichnungen die Bewegungen der Grundwasseroberfläche hier kurz dargestellt und erläutert sowie zu den Lysimetermessungen in Beziehung gebracht werden. Sämtliche Grundwasserstandsmessungen und Auswertungen können über die LANUV-Website abgerufen und in verschiedener Form grafisch dargestellt werden. Sie basieren auf der Datenbank HygrisC3 und werden über das Fachinformationssystem ELWAS zugänglich gemacht.

Die Grundwasserbewegungen im Bereich der Lysimeteranlage zeigt die Ganglinie des Beobachtungsbrunnens VII/38 LYS.ST.ARND. seit Messbeginn von November 1970 bis zum Jahr 2015 (s.a. Kapitel 2.3). Zur Orientierung werden auch die Ganglinien der Monatsmittel sowie der Monatsminima und Monatsmaxima dargestellt (Abbildung 51).



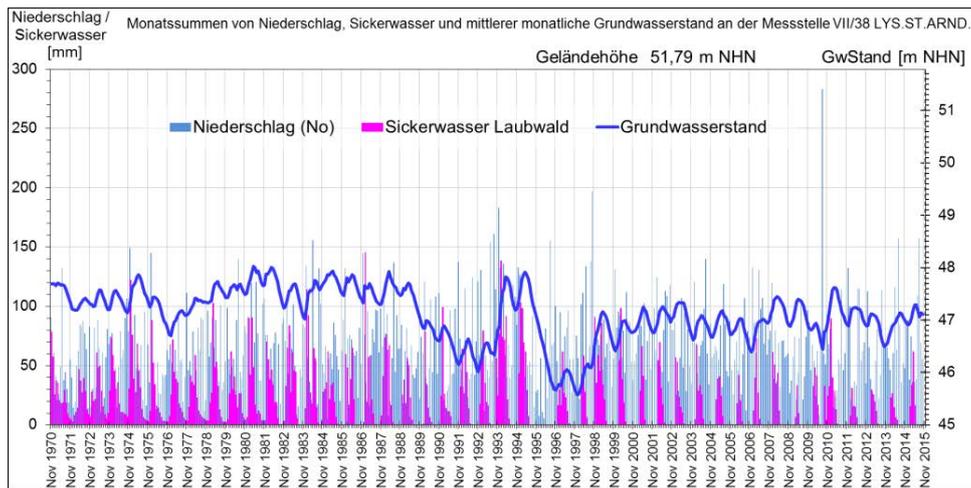
**Abbildung 51:** Zeitreihe der Grundwasserstände an der Messstelle VII/38 LYS.ST.ARND. Grundwasserstandsganglinie (blau), Ganglinie der Monatsmittel (grün), Monatsminima (rot) und Monatsmaxima (violett)

Hierbei fällt auf, dass in der ersten Hälfte der Zeitreihe meist höhere Grundwasserstände überwiegen, in der auch das Maximum mit 48,08 m +NHN am 6. April 1981 erreicht wird. Von 1990 bis 1993 folgen unterdurchschnittliche Stände. Danach steigt das Grundwasser wieder sprunghaft an und erreicht in den zwei Jahren fast Höchstniveau, um im anschließenden Jahr auf nahezu den Tiefststand abzusinken, der sich am 29. Dezember 1997 einstellt. Auch 1998 bleibt das Grundwasser tief, steigt aber mit Beginn des Abflussjahres 1999 wieder und hält sich anschließend auf eher mittlerem Niveau. Der sich aus der Ganglinie ergebende fallende Trend der Grundwasserstände in diesem Bereich des Münsterländer Kiessandzuges wird abgeschwächt, wenn man von noch weiter zurück liegenden Jahren die Grundwasserstandsaufzeichnungen betrachtet. Solche liegen seit dem Jahr 1950 von einer ca. 400 m weiter nordwestlich gelegenen Messstelle bzw. deren Ersatzmessstelle vor (Abbildung 52), die beide denselben Grundwasserleiter wie die Messstelle an der Lysimeteranlage erfassen. Allerdings ist hier der Grundwasserflurabstand im Mittel 1 – 2 m geringer.



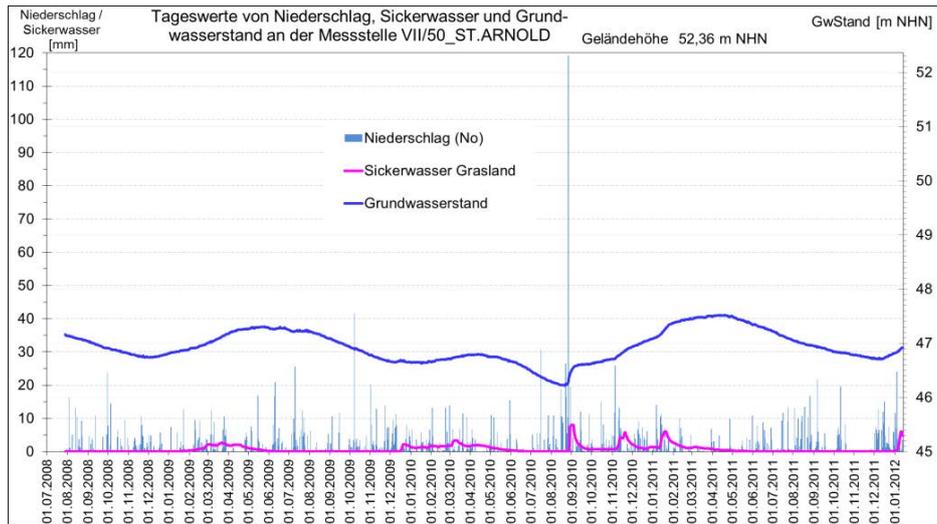
**Abbildung 52:** Zeitreihe der Grundwasserstände an der Messstelle VII/22 SANKT-A. alt (119906016) und Ersatzmessstelle VII/22 SANKT-ARNOLD (110070227)

Dennoch sind, wie aus der Abbildung zu entnehmen, die Grundwasserbewegungen an den Messstellen fast identisch. Somit lässt sich das Geschehen um das Grundwasser im Bereich der Lysimeteranlage auch vor ihrer Inbetriebnahme und der Grundwassermessstelle VII/38 LYS.ST.ARND. darstellen. Demnach herrschten gegen Ende April 1966 die höchsten Grundwasserstände wie vielfach in Nordrhein-Westfalen, ebenso die Lysimeterabläufe wiesen maximale Werte auf. Auch im Jahr 1967 stand besonders im Januar das Grundwasser hoch. Es sank dann in der ersten Hälfte der 1970er Jahre wieder auf mittleres Niveau. Dieses wurde vor 1966 in etwa gleichermaßen über und unterschritten. Ob im fallenden Trend der Grundwasserstände auch eine Komponente des Klimawandels zugrunde liegt, ist nicht auszuschließen (vgl. z.B. LANUV 2017).



**Abbildung 53:** Monatssummen des Niederschlags- und Sickerwassers am Laubwald-Lysimeter sowie Ganglinie der mittleren monatlichen Grundwasserstände an der Messstelle VII/38 LYS.ST.ARND., Nr. 110070380

In Abbildung 53 sind die mittleren monatlichen Grundwasserstände an der Messstelle auf dem Lysimetergelände zusammen mit den Sickerwasser- und Niederschlagsmengen des jeweiligen Monats aufgetragen, um den Zusammenhang dieser Größen zu zeigen. Da sich die Grundwassermessstelle VII/38 LYS.ST.ARND. im Bereich einer mit Laubgehölz bestockten Fläche befindet, wurden zur Darstellung die Sickerwasserbeträge des Laubwald-Lysimeters verwendet. Es ist zu erkennen, wie beim Einsetzen der Grundwasserneubildung bzw. der Sickerwasserbildung die Grundwasseroberfläche mit einem meist etwas zeitlich verzögerten Anstieg reagiert. Hohe Niederschläge führen nicht zwangsläufig zu Sickerwasser und damit zu einem Grundwasseranstieg, wenn sie zur Bodenaufsättigung oder von der Vegetation aufgebraucht werden. Dies zeigt die Abbildung 53 in eindrucksvoller Weise für das Abflussjahr 1996, in dem eine Grund- bzw. Sickerwasserbildung unter Waldbestand ausblieb. Entsprechend fiel die Grundwasseroberfläche stark ab und erholte sich erst wieder als nach vorhergehender Sättigung des Bodens im Dezember ein Sickerwasserabfluss zu vermerken war. Bei Bodensättigung kann es im Ausnahmefall auch im Sommer zur Grundwasserneubildung kommen, wie beispielsweise Ende August 2010 nach mehreren vorangegangenen Regentagen und dem Niederschlagsereignis vom 26. August mit 119 mm. Dies veranschaulicht die Abbildung 54 durch einen Zeitreihenausschnitt mit der Ganglinie von täglich registrierten Grundwasserständen an der Messstelle VII/50\_ST.ARNOLD und den Tageswerten von Niederschlag und Sickerwasser am Grünland-Lysimeter, das zum Standort dieser Grundwassermessstelle passt. Einen Tag nach dem Regenereignis kam es hier bereits zu einem stärkeren Anstieg des Grundwassers zunächst um 32 cm bis auf ein Niveau von 46,6 m NHN, das am 10. September erreicht und vier Tage bis zu einem weiteren Anstieg gehalten wurde (s. Abbildung 54). In dieser Zeit wurde eine Sickerwassermenge von 76,4 mm gemessen.



**Abbildung 54:** Tageswerte des Grundwasserstandes an der Messstelle VII/50\_ST.ARNOLD, Nr. 110070501 sowie Tagessummen von Niederschlag und Sickerwasser am Grünland-Lysimeter

Das entspricht einer Auffüllhöhe eines Sandes mit rd. 20 % effektivem Porenvolumen von rd. 38 cm, eine Größenordnung ähnlich wie der beobachtete Grundwasseranstieg. Dieser ist in der Regel geringer als der Grundwasserneubildung entspricht, weil sogleich ein Teil über die Vorfluter abfließt.

Die zweite Sickerwasserwelle, die am 6. November 2010 beginnt, geht wiederum mit einem Anstieg der Grundwasseroberfläche einher. Das Maximum des anschließenden dritten Sickerwasser-schubes fällt auf den 20. Januar 2011 und folgt einem beginnenden Anstieg des Grundwassers auf sein Jahresmaximum von 47,52 m NHN, das an einigen Tagen zwischen dem 10. und 19. April 2011 erreicht wird. Die Maxima der Grundwasserstände folgen also denen der Sickerwasserabläufe am Lysimeter zeitversetzt.

## 3.2 Qualitative Messungen

### 3.2.1 Beschaffenheit des Niederschlagswassers

Die Hauptbestandteile des Niederschlagswassers sind die Kationen Natrium ( $\text{Na}^+$ ), Kalium ( $\text{K}^+$ ), Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) sowie die Anionen Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ), Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Sulfid ( $\text{SO}_3^{2-}$ ), Hydrogenkarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ), Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) und Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) bei pH-Werten zwischen 3 und 10 (MATTHEß 1990). Die Stoffkonzentrationen der Hauptkationen und -anionen unterscheiden sich regional, zeitlich sowie von Menge und Form der Niederschläge, der Temperatur oder Wetterlagen-bedingt. Die Stoffe sind geogener, biogener und anthropogener Herkunft und werden aus Gasen sowie festen und flüssigen Schwebeteilchen in der Atmosphäre herausgelöst.

Von dem Niederschlagswasser an der Lysimeterstation St. Arnold stehen Analysen von pH-Wert, Leitfähigkeit, Ammonium, Nitrit, Nitrat und Gesamtstickstoff aus der Zeit von Januar 2004 bis März 2008 zur Verfügung. Im Jahr 2004 wurden 42 Analysen durchgeführt, 22 im Jahr 2005, 19 in 2006, im Jahr 2007 waren es 22 und 8 Analysen in 2008.

Das gasförmige Ammoniak in der Atmosphäre wird im leicht sauren Regen zu Ammonium umgewandelt. Die Werte liegen im Mittel bei 1,8 mg/l im Bereich von 0,9 bis 5,6 mg/l. Der hohe Maximum-Wert von 7,8 mg/l bei Nitrit kommt in dieser Größenordnung nur einmal vor.

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Maß für den Gesamtlösungsgehalt.

Die Zeitreihe für den pH-Wert ist praktisch trendlos. Bei allen anderen Stoff-Parametern ist eine eher fallende Tendenz in dieser Zeit zu beobachten. Einige statistische Parameter von den untersuchten Inhaltsstoffen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

**Tabelle 15:** Statistik der Ergebnisse der Niederschlagswasseranalysen von 2004 bis 2008

Niederschlagswasser St. Arnold	pH-Wert	Leitfähigkeit [mSm]	Ammonium-N [mg/l]	Ammonium [mg/l]	Nitrit-N [mg/l]	Nitrit [mg/l]	Nitrat-N [mg/l]	Nitrat [mg/l]	Gesamt-N [mg/l]
Anzahl der Messwerte	104	104	105	105	103	103	103	103	105
Median	6,65	4,00	1,43	1,84	0,020	0,066	0,550	2,435	2,8
10er-Perzentil	5,97	2,00	0,70	0,90	<0,005	<0,016	0,350	1,549	1,3
75er-Perzentil	6,91	5,00	2,62	3,37	0,050	0,164	0,860	3,807	4,6
90er-Perzentil	7,13	8,00	4,36	5,62	0,080	0,263	1,336	5,914	7,4

Danach liegt der pH-Wert überwiegend im neutralen bis schwach sauren Bereich.

Darüber hinaus wurde noch auf folgende 29 organische Stoffe im Dezember 2005 sowie im Januar, Februar und März 2006 analysiert:

Benzol, Toluol, Ethylbenzol, p-Xylol, m-Xylol, i-Propylbenzol, o-Xylol, 3+4-Ethyltoluol, 1,3,5-Trimethylbenzol, Methyl-tert-butylether, 2-Ethyltoluol, Dichlormethan, Trichlormethan, 1,1,1-Trichlorethan, Tetrachlormethan, 1,2-Dichlorethan, Trichlorethen, 1,2-Dichlorpropan, 1,1,2-Trichlorethan, Tetrachlorethen, 1,2,3-Trichlorpropan, Hexachlorethan, Hexachlorbutadien, 1,3-Dichlorbenzol, 1,4-Dichlorbenzol, 1,2-Dichlorbenzol, 1,3,5-Trichlorbenzol, 1,2,4-Trichlorbenzol, 1,2,3-Trichlorbenzol.

Die Konzentrationen dieser Stoffe lagen stets unter der Nachweisgrenze.

### **3.2.2 Beschaffenheit des Sickerwassers**

Das versickernde Niederschlagswasser unterliegt während der Bodenpassage bis es auf das Grundwasser trifft, stofflichen Veränderungen, die durch Lösungsvorgänge und biochemische Prozesse ausgelöst werden. Sie sind im Einzelnen sehr komplex und hängen von den verschiedensten Faktoren im Boden ab. So können dabei auch Einflüsse des gestörten Bodenprofils im Lysimeter eine Rolle spielen, z.B. durch unterschiedliche Redox-Potentiale im ungestörten und gestörten Boden.

Im Vergleich zum Niederschlagswasser weist das Sickerwasser eine allgemein höhere Stoffkonzentration auf, sichtbar hier an der höheren Leitfähigkeit und Nitrat bzw. Nitrat-Stickstoff (vgl. Tabelle 15 und Tabelle 16).

Neben den bereits veröffentlichten und weiteren nicht veröffentlichten Analyseergebnissen der Sickerwässer (SCHROEDER 1976, 1992; VAN GRINSVEN, J.J.M. & WESSELINK, L.G. & SCHROEDER, M. & VAN BREMEN, N. 1991; LEGGE 2005) standen noch die Analyseergebnisse mehrerer Wasserproben aus den drei Lysimeterbecken von den Jahren 2005 bis 2007 zur Verfügung. Die Konzentration der untersuchten Inhaltsstoffe im Sickerwasser der drei Lysimeterbecken geht aus der Tabelle 16 bei Nennung von Größen einiger statistischer Parameter hervor.

Während Ammonium, Nitrit, Eisen, Gesamt-Phosphat, Chlorid, Kalium und in etwa noch der pH-Wert bei allen Lysimeterabläufen in ähnlicher Größenordnung liegen, ist bei den Kiefern Nitrat auffallend hoch.

**Tabelle 16:** Statistik der Analysenergebnisse der Sickerwasserabläufe von 2005 bis 2007

Lysimeter-Sickerwasser	Lysimeter-Vegetation	Anzahl Messwerte	Median	10er-Perzentil	75er-Perzentil	90er-Perzentil
<b>pH-Wert</b> (Labor)	Gras	76	7,17	6,74	7,37	7,54
	Laubwald	26	7,5	7,21	7,69	7,83
	Nadel-/Pionierwald	53	7,5	7,09	7,63	7,73
<b>Leitfähigkeit</b> (Labor) [mSm]	Gras	76	(27)	(18)	(31)	(39)
	Laubwald	26	27	25	30	37
	Nadel-/Pionierwald	53	37	35	39	41
<b>Ammonium</b> [mg/l]	Gras	76	<0,13	<0,13	<0,13	<0,13
	Laubwald	26	<0,13	<0,13	<0,13	<0,13
	Nadel-/Pionierwald	53	<0,13	<0,13	<0,13	<0,13
<b>Nitrit</b> [mg/l]	Gras	76	<0,016	<0,016	<0,016	0,033
	Laubwald	26	<0,016	<0,016	<0,016	0,049
	Nadel-/Pionierwald	53	0,024	<0,016	<0,016	0,099
<b>Nitrat</b> [mg/l]	Gras	76	(0,64)	<0,22	(1,59)	(3,45)
	Laubwald	26	<0,22	<0,22	<0,22	0,49
	Nadel-/Pionierwald	53	50,03	45,69	52,24	53,48
<b>Gesamtstickstoff</b> [mg/l]	Gras	76	<1,0	<1,0	(1)	(5,4)
	Laubwald	26	<1,0	<0,9	<1,0	1,3
	Nadel-/Pionierwald	53	12,6	11,2	13,7	14,4
<b>Gesamtphosphat-P</b> [mg/l]	Gras	76	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
	Laubwald	26	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
	Nadel-/Pionierwald	53	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
<b>Chlorid</b> [mg/l]	Gras	76	(16)	(7)	(48)	(83)
	Laubwald	26	17	13	19	20
	Nadel-/Pionierwald	53	18	16	21	24
<b>Sulfat</b> [mg/l]	Gras	76	22	10	28	31
	Laubwald	26	33	25	35	37
	Nadel-/Pionierwald	53	45	37	55	57
<b>Eisen</b> [mg/l]	Gras	76	<0,02	<0,02	0,03	0,07
	Laubwald	26	<0,02	<0,02	0,03	0,05
	Nadel-/Pionierwald	53	<0,02	<0,02	0,03	0,05
<b>Kalium</b> [mg/l]	Gras	76	(4,1)	(2,4)	(5,1)	(5,6)
	Laubwald	26	5,4	4,2	5,7	6,8
	Nadel-/Pionierwald	53	5,6	4,8	6,3	7,3

Anmerkung: die in Klammern gesetzten Messwerte können durch den Düngeversuch am Gras-Lysimeter beeinflusst sein

Die hohen Nitrat-Werte stammen aus der erhöhten Auskämmung durch Nadelwald infolge der Exposition des Standortes, wie schon anderweitig festgestellt, also von Interzeptionsdepositionen (s. weiter unten) sowie von natürlichen Nitrifikationsprozessen. Die Perzentilverteilung zeigt, dass wir uns im Jahr 2005 – 2007 auf einem einheitlich hohen Niveau bewegen. Unter Laubwald wurde Nitrat meist nicht mehr nachgewiesen, wohingegen unter Gras geringe Mengen von meist weniger als 1 bis 6 mg/l gemessen wurden. LEGGE (2005) vermutet hier aufgrund des öfter in den sauren Bereich schwankenden pH-Wertes eine Nitrifikation von Ammonium. Ammonium und Nitrit liegen häufig unter der Nachweisgrenze. Dasselbe gilt auch für Gesamtphosphat-P und Eisen. Die Sulfat-Konzentration hebt sich mit meist zwischen 40 und 50 mg/l bei den Kiefern-Abläufen heraus, wo auch der höchste Maximalwert von ca. 100 mg/l auftrat, während sich bei den Abläufen unter Gras und Laubwald die meisten Werte zwischen 15 und 35 mg/l bewegen. Bei der Ursache für die erhöhten Nitrat- und Sulfat-Konzentration spielt die Interzeption von Stickstoff- und Schwefel-Depositionen durch

die Bäume eine Rolle (SCHROEDER 1992). Diese aus Landwirtschaft, Verkehr, Kraftwerke/Industrie stammenden Depositionen schlagen sich dann verstärkt am Boden nieder und tragen so zu einer Erhöhung dieser Stoffeinträge bei. Der Anstieg des Nitrats und Chlorids im Sickerwasser des Grünland-Lysimeters zum Ende des Jahres 2005 sind auf einen Düngerversuch mit Wirtschaftsdünger von April bis Juni zurückzuführen. LEGGE (2005) schließt daraus auf eine Durchsickerungszeit der 3,5 m langen Bodenpassage von rd. einem halben Jahr.

Die Kalium-Konzentrationen an den drei Lysimetern sind untereinander mit Werten vielfach zwischen 2 und 8 mg/l recht ähnlich, obwohl beim Gras-Lysimeter eine Düngung erfolgt. Dass erhöhte Kalium-Gehalte im Sickerwasser der gedüngten Grasfläche gegenüber den ungedüngten Waldflächen nicht festzustellen sind, hatte bereits SCHROEDER (1976) vermerkt. Eher zeigten sich gerade dort die etwas höheren Werte. Auch die Analysen der Jahre 2005 – 2007 weisen dort im Mittel einen um ca. 1 mg/l höheren Kalium-Wert nach (Tabelle 16), was allerdings nicht für die nachfolgenden Jahren gelten muss.

Wie im Vergleich zu erkennen ist, steigt mit zunehmender Sickerwassermenge bisweilen auch der Kalium-Gehalt an, besonders deutlich am Gras-Lysimeter. Noch enger wird diese Beziehung beim Nitrat.

Was die Beschaffenheit des Grundwassers im Bereich der Lysimeteranlage anbetrifft (s.a. Kapitel 2.3), so sei hier auf das Fachinformationssystem ELWAS hingewiesen, über das in die Messwerte und Auswertungen Einsicht genommen werden kann.

Sämtliche Publikationen und Forschungsprojekte im Zusammenhang mit der Großlysimeteranlage St. Arnold wurden beim LANUV auch chronologisch gesammelt. Auf Anfrage kann seitens des LANUV (s. Ansprechpartner zur Lysimeteranlage, <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/lysimeter/>) eine Liste mit Kurzbeschreibungen der Studien zur Verfügung gestellt werden.

## 4 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Die Lysimeteranlage St. Arnold wurde im November 1964 in Betrieb genommen, um genaue Daten zur Grundwasserneubildung, insbesondere unter Wald zu erhalten, weil die zunehmend konkurrierende Flächennutzung belastbare Daten zum Grundwasserhaushalt erforderte. Aufgrund der langen Zeitreihen hydrometeorologischer Daten ist die Lysimeteranlage St. Arnold auch zur Feststellung von Einflüssen des Klimawandels von großer Bedeutung.

Bei der Untersuchung der langjährigen Zeitreihen bis zum Jahr 2015 wurden folgende Auffälligkeiten festgestellt:

Sonnenscheindauer und Lufttemperatur zeigen einen signifikanten Anstieg über den 50jährigen Zeitraum sowie eine insgesamt abnehmende Tendenz in der relativen Luftfeuchte. Beim Niederschlag ist eine Zunahme von Starkregenereignissen zu beobachten.

Die Sickerwassermenge nimmt sowohl bei den Wald-Lysimetern als auch beim Grünland-Lysimeter ab, wobei dort nach 1990 erstmals Monate ohne Sickerwasser auftreten, möglicherweise eine Folge des Klimawandels.

Die für Wasserhaushaltsberechnungen besonders wichtige Größe der aktuellen Verdunstung wird aus Niederschlag und Sickerwasser ermittelt und liegt bei den drei Lysimetern im 50jährigen Mittel etwa in der Größenordnung früherer Prognosen (Grünland 380, Laubwald 480, Nadelwald 600 mm/Jahr), wobei sich für das Laubwald-Lysimeter der höher prognostizierte Wert von 540 mm/Jahr bestätigt. Nachdem sich in den 80er Jahren eine gewisse Konstanz beim Grünland- und Nadelwald-Lysimeter in der Verdunstung eingestellt hatte, stieg diese wie auch beim Laubwald-Lysimeter nach 1990 wieder deutlich an und liegt heute beim Nadelwald bei 640 und beim Laubwald bei 660 mm. Diese Werte gelten nur für ausgewachsene Waldbestände, ohne Aufwuchsphase.

Auch die Verdunstung der letzten Jahre für das Grünland-Lysimeter ist außergewöhnlich hoch, so dass es hierzu weiterer Beobachtungen bedarf (s. Kapitel 6). Demnach ist von 430 mm/Jahr, einem Mittelwert der Jahre 1991/2015, für flache dauerhafte Vegetation auszugehen.

Der seit Januar 2007 infolge eines Sturms zerstörte Nadelwald wird durch einen in der Aufwuchsphase befindlichen Pionierwald (Laubmischwald) ersetzt, dessen Verdunstung im Jahr 2015 mit 560 mm erstmalig deutlich über der des Grünland-Lysimeters liegt. Das bedeutet, ein aufwachsender Wald mit einem Alter von knapp 10 Jahren verbraucht bereits Wasser in einer für Wald größenordnungsmäßigen Menge.

Die Ergebnisse der verfügbaren Interzeptionsmessungen aus den Jahren 1984 bis 1990 und 2003/2004 sowie die seit November 1997 berechnete potenzielle Verdunstung nach HAUDE zeigen eine ansteigende Tendenz, was mit den Beobachtungen an den Lysimetern konform geht.

Durch den Vergleich mit benachbarten Grundwassermessstellen wird deutlich, dass der geringere Sickerwasseranfall am Lysimeter zu einer geringeren Grundwasserneubildung führte, die ein Absinken der Grundwasseroberfläche auslöste. Nach Starkregenereignissen kann es in nassen Perioden auch zur Grundwasserneubildung im Sommer kommen.

Im Sickerwasser des Nadelwald-Lysimeters sind die Sulfat- und Nitrat-Gehalte erhöht infolge des Auskämmeffektes von Stickstoff- und Schwefel-Depositionen. Bei Konzentrationen von Gesamt-Stickstoff von ca. 1 bis 7,5 mg/l im Niederschlag finden sich im Sickerwasserablauf unter Nadelwald im Zeitraum 2005 bis 2007 durchweg hohe Nitrat-Konzentrationen von ungefähr 50 mg/l.

Der Ammonium-Gehalt des Niederschlagswassers unterliegt großen Schwankungen, die herkunftsbedingt sind, u.a. landwirtschaftliche Einträge, abhängig von der Windrichtung aus unterschiedlichen Einzugsgebieten und den Gülle-Ausbringungszeiten.

Die verschiedenen Untersuchungsprojekte mit Bezug zur Lysimeteranlage St. Arnold sind in weiteren Schriften publiziert (s. Publikationsliste; weiteres auf Anfrage beim LANUV).

## 5 Literatur

- BATTELLE-INSTITUT e.V. (1972): Wasserbedarfsentwicklung in Industrie, Haushalten, Gewerbe, öffentlichen Einrichtungen und Landwirtschaft. Prognose des Wasserbedarfs in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahre 2000.- 211 S.; Frankfurt/Main.
- BRAUN, G. (1975): Entwicklung eines physikalischen Wasserhaushaltsmodells für Lysimeter.- Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, 49: 1-39; Braunschweig.
- DALTON, J. (1802): Experiments and observations to determine whether the quantity of rain and dew is equal to the quantity of water carried off by the rivers and raised by evaporation; with an enquiry into the origin of springs.- Memoirs of the Proceedings of the Literary and Philosophical Society of Manchester, 5 (2): 346-372; Manchester.
- DARCY, H. (1856): Les fontaines publiques de la ville de Dijon.- 674 S.; Paris (Dalmont).
- DE LA HIRE, P. (1703): Remarques sur l'eau de la pluie, et sur l'origine des fontaines; avec quelques particularités sur la construction des cisternes.- Memoires de l' Academie Royale, 1703: 56-69; Paris.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2012): Globalstrahlung – Die Energie der Sonne.- Broschüre 20 S.; Hamburg (Klima- und Umweltberatung). Online-Datei: [http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimagutachten/Solarenergie/Broschuere\\_DINA5\\_052012\\_grossePDF,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Broschuere\\_DINA5\\_052012\\_grossePDF.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimagutachten/Solarenergie/Broschuere_DINA5_052012_grossePDF,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Broschuere_DINA5_052012_grossePDF.pdf)
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1994): DIN 4049 Teil 3: Hydrologie: Begriffe zur quantitativen Hydrologie.- Berlin (Beuth Verlag GmbH).
- DVWK / FH-DGG FACHAUSSCHUß GRUNDWASSERERKUNDUNG (1980): Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern.- DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, 114: 52 S.; Hamburg, Berlin (Paul Parey Verlag).
- DVWK / DVWK-FACHAUSSCHUß „VERDUNSTUNG“ (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen.- DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 238/1996: 135 S.; Bonn (Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH).
- EL-MADANY, T. & ENGEL, I. & GONSER, S. & HARSCH, N. & HILGENBERG, A. & HOMMELTENBERG, J. & JUNGE, J.-T. & KAMPLING, N. & LEISE, S. & MICHELBACH, T. & REDEKER, J. & STRÄTER, E. & WESTBELD, A. (2007): Studienprojekt 2007 Biosphäre/Atmosphäre-Austausch.- Studienprojektbericht des Institutes für Landschaftsökologie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster: 97 S.; Münster (unveröffentlicht).
- FLENDER, A. (1999): Großlysimeter St. Arnold bei Rheine.- Bericht: 23 S.; Münster (unveröffentlicht).
- FRAAS, C.N. & ZOLLER, R. (1859): Weitere Ergebnisse der Versuche mit Lysimetern (Unterirdischen Regenmessern).- Ergebnisse Landwirtschaftlicher und Agriculturchemischer Versuche, 2: 60-84; München (Landwirtschaftlicher Verein in Bayern).
- FRIEDRICH, W. & FRANZEN, H. (1960): Ein neuer Versickerungsmesser (Lysimeter).- Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen, 4: 105-111; Koblenz.

- GEHRMANN, J. (2016): Wasserhaushaltsuntersuchungen im Wald, Reaktion auf extreme Witterungsverhältnisse (Forstl. Umweltmonitoring) (FB25).- Entwurf für den Klimabericht Nordrhein-Westfalen 2016 des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV): 3 S.; Recklinghausen (unveröffentlicht).
- GLUGLA, G. & FISCHER, D. & HOHNE, U. & KORTUM, F. & HELBIG, A. (1982): Lysimeteruntersuchungen in der *Letzlinger Heide* - wichtiger Beitrag zur Bestimmung der Wasserressourcen bewaldeter Gebiete.- *Wasserwirtschaft, Wassertechnik*, 32 (9): 319-322; Berlin.
- GROBE, A. (2003): Entwicklung und Implementation eines Stofftransportmoduls für das Wasserhaushaltsmodell LYFE.- Diplomarbeit des Instituts für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück: 93 S.; Osnabrück (unveröffentlicht).
- HAGEN, G. (1839): Über die Bewegung des Wassers in engen cylindrischen Röhren.- *Annalen der Physik und Chemie*, 46: 423-442; Leipzig.
- HAGENAU, J. (2014): Wasser- und Stoffhaushalt der wägbaren Lysimeterstation Colbitz.- Studie im Auftrag des Landesbetriebes für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt: 121 S.; Halle an der Saale.
- HARSCH, N. (2008): Großlysimeteranlage St. Arnold 1965-2007.- Diplomarbeit des Institutes für Landschaftsökologie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster: 47 S.; Münster (unveröffentlicht).
- HARSCH, N. & BRANDENBURG, M. & KLEMM, O. (2009): Large-scale lysimeter site St. Arnold, Germany: analysis of 40 years of precipitation, leachate and evapotranspiration.- *Hydrology and Earth System Science*, 13: 305-317; Göttingen. Online-Datei: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/305/2009/hess-13-305-2009.html>
- HAUDE, W. (1954): Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evaporation und Evapotranspiration.- *Mitteilungen des deutschen Wetterdienstes*, 1 (8): 1-22; Bad Kissingen.
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise.- *Mitteilungen des deutschen Wetterdienstes*, 2 (11): 1-24; Bad Kissingen.
- HAUSHOFER, H. (1962): Die Erfindung des Lysimeters.- *Zeitschrift für Agrargeschichte und Agrarsoziologie* 10: 57-60, Frankfurt a.M.
- KLEIN, M. (1995): Modellierung des Wasserhaushaltes eines Großlysimeters unter Gras.- Diplomarbeit Universität Osnabrück: 183 S.; Osnabrück.
- KLEIN, M. (2000): Langjähriger Wasserhaushalt von Gras- und Waldbeständen – Entwicklung, Kalibrierung und Anwendung des Modells LYFE am Groß-Lysimeter St. Arnold.- *Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück*, 17: Dissertation 211 S.; Osnabrück.
- KOHNKE, H. & DREIBELBIS, F.R. & DAVIDSON, J.M. (1940): A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance.- United States Department of Agriculture, Miscellaneous Publication No. 372: 68 S.; Washington.

- KRETZSCHMAR, R. (1999): Lysimetermessungen - Erfassung von Stoff-, Wasser- und Wärmehaushaltsgrößen von Böden, Standorten und Landschaften unter weitgehend natürlichen Bedingungen.- Berichtsmanuskript, März 1999: 22 S.; Kiel, Kirchbarkau (unveröffentlicht).
- KUNTZE, R. (1984): Qualitative Niederschlagsuntersuchungen unter besonderer Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse.- Schriftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das Lehramt für die Sekundarstufe II: 78 S.; Münster (unveröffentlicht).
- LANTHALER, C. (2006): Lysimeter in Europa – Ausführung, Aufgaben, Ergebnisse und Ziele.- Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 10: 50-59; Jena.- (Tagungsband der Wissenschaftlichen Tagung 2006 am 20. bis 22. Juni 2006 in Jena, Sektion Lysimetertagung).
- LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2017): Auswirkungen des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen – Klimafolgenmonitoring 2016.- LANUV-Info 38; 36 S.; Recklinghausen.
- LAWES, J.B. & GILBERT, J.H. & WARINGTON, R. (1881): On the amount and composition of the rain and drainage-waters collectet at Rothamsted. Part I and II. The amount and composition of rainfall.- Journal of the Royal Agricultural Society of England, 17: 241-279; Part II. The amount and composition of the drainage-waters from unmanured fallow land.- 311-350; London.
- LEDER, B. (2012): Versuchsfläche Großlysimeter St. Arnold.- Vermerk des Lehr- und Versuchsforstamtes Arnsberger Wald, SPA Waldbau und Forstvermehrungsgut, Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen: 2 S.; Arnsberg (unveröffentlicht).
- LEGGE, B. (2005): Qualitative Untersuchungen an der Großlysimeteranlage in St. Arnold.- Praktikumsbericht: 23 S.; Münster (unveröffentlicht).
- LEUCHS, W. & BERGMANN, S. & LEVACHER, D. & NEUMANN, P. (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf Grundwasserhaushalt.- Berichte aus dem IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, 46: 57-76; Mülheim an der Ruhr.
- LEUCHS, W. & BERGMANN, S. (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf Grundwasserhaushalt und Wasserversorgung.- Bericht des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV): 23 S.; Recklinghausen (unveröffentlicht).
- LEUCHS, W. & BERGMANN, S. (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf Grundwasserhaushalt und Wasserversorgung.- PowerPoint-Präsentation des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) zur 41. Essener Tagung (2. bis 4. April 2008) Wasser- und Abfallwirtschaft im Zeichen des Klimawandels: 21 S.; Düsseldorf.

- LÖLF (1994): Wassermengen und Analysenergebnisse aus Freilandniederschlag, Kronentraufe des Kiefern- und Buchenbestands und Buchen-Stammabfluss der Lysimeteranlage St. Arnold.- Analysen der ehemaligen Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung NRW, jetzt in ECO-Datenbank des Fachgebietes 25 des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV); Recklinghausen (unveröffentlicht).
- MATTHEß, G. (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers.- Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 2: 498 S.; Berlin, Stuttgart (Gebrüder Borntraeger).
- MATTHEß, G. & UBEL, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie Grundwasserhaushalt.- Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 1: 438 S.; Berlin, Stuttgart (Gebrüder Borntraeger).
- MÜLLER, J. (2011): Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasserhaushaltes in Wäldern des nordostdeutschen Tieflands.- Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz, 12: 37-46; Remagen-Oberwinter.
- POISEUILLE, J. L. M. (1839): Recherches sur les causes du mouvement du sang dans les vaisseaux capillaires.- 80 S.; Paris (Imprimerie Royale).
- PRENK, J. & FLENDER, A. (1965): Die Großlysimeteranlage St. Arnold bei Rheine.- Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen, 9 (6): 132-135; Koblenz.
- PRINZ-TRAN, I. (2010): Bodenwasserhaushalt unter Gras und Wald – Numerische Simulation der Wasserbewegung im Großlysimeter St. Arnold mittels Bromidtracer.- Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück, 52: Diplomarbeit 59 S.; Osnabrück.
- RIJTEMA, P.E. (1965): An analysis of actual evapotranspiration.- Agricultural Research Report, 659: 107 S., PUDOC; Wageningen NL.
- SALISBURY, F.B. & ROSS, C. (1969): Plant Physiology.- 764 S.; Belmont/California (Wadsworth Publishing Company).
- SANBORN, J.W. (1889): A new lysimeter.- Proceedings of the Society for the Promotion of Agricultural Science, 10: 54-59; Columbus / Ohio (Gazette printing house).
- SCHROEDER, M. (1969 a): Ergebnisse von Lysimetermessungen aus dem Münsterland.- Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen, Sonderheft 1969: 45-51; Koblenz.
- SCHROEDER, M. (1969 b): Lysimetermessungen unter Hochwald.- Erfahrungen der Anlage Hamm-Bossendorf.- Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 140 (3): 45-49; Frankfurt a. M.
- SCHROEDER, M. (1970): Untersuchungen an Lysimetern mit Waldbestockung.- Mitteilungen des Arbeitskreises „Wald und Wasser“, 5: 27-33; Essen.
- SCHROEDER, M. (1971 a): Der winterliche und sommerliche Wasserhaushalt von Sand und Löß – eine Analyse der Halbjahresdaten der wägbaren Lysimeteranlage Senne.- Wasser und Boden, 23 (9): 257-260; Hamburg, Berlin.
- SCHROEDER, M. (1971 b): Sickerwasserablauf und Bodenfeuchte bei der wägbaren Lysimeteranlage Senne.- Wasserwirtschaft 61: 245-247; Stuttgart.

- SCHROEDER, M. (1973): Die wägbare Lysimeteranlage Senne.- Schriftenreihe der Landesanstalt für Gewässerkunde und Gewässerschutz NRW, 34: 41 S.; Krefeld.
- SCHROEDER, M. (1975): Erste Ergebnisse der Großlysimeteranlage St. Arnold bei Rheine.- Die Wasserwirtschaft, 65 (11): 301-305; Stuttgart.
- SCHROEDER, M. (1976): Untersuchungen über die Sickerwasserqualität unter Grünland und Wald auf der Großlysimeteranlage St. Arnold.- Forschung und Beratung, Reihe C, 30: 55-68; Düsseldorf (MELF NRW).
- SCHROEDER, M. (1977): Wasserflüsse im ungesättigten Bodenbereich.- Beiträge zur Hydrologie, 4: 81-113; Freiburg.
- SCHROEDER, M. (1983): Ziel der Wasserqualitätsuntersuchungen auf der Großlysimeteranlage St. Arnold.- Stellungnahme und Vermerk vom 3.3.1983: 5 S.; Münster (unveröffentlicht).
- SCHROEDER, M. (1983): Neue Werte zur Grundwasserneubildung unter Wald für das Münsterland.- Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen 27 (4): 121-124; Koblenz.
- SCHROEDER, M. (1984): Die Interzeptionsmessungen an der Großlysimeteranlage St. Arnold.- Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen, 28 (5/6): 164-171; Koblenz.
- SCHROEDER, M. (1985): Jahreswerte der Waldverdunstung und ihrer Teilgrößen an der Großlysimeteranlage St. Arnold .- Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen, 29 (5): 95-97; Koblenz.
- SCHROEDER, M. (1987): Jahreswerte der Waldverdunstung und ihrer Teilgrößen an der Großlysimeteranlage St. Arnold (Lysimeterjahre 1976/77 bis 1985/86).- Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen, 31 (1): 21-23; Koblenz.
- SCHROEDER, M. (1988): 15 Jahre Messungen an der Großlysimeteranlage St. Arnold (Zeitreihenanalysen, Interzeptionsuntersuchung, Simulationsmodelle).- LWA Schriftenreihe 44: 66 S.; Düsseldorf (Landesamt für Wasser und Abfall NRW).
- SCHROEDER, M. (1989): Interzeptionsmessungen an der Großlysimeteranlage St. Arnold in den Jahren 1984 bis 1987 und die Extrapolation der Meßwerte mit Hilfe eines Rechenmodells.- Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen, 33 (2): 56-64; Koblenz.
- SCHROEDER, M. (1989): Die Großlysimeteranlage St. Arnold bei Rheine.- Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 58: 323-326; Göttingen, Oldenburg.
- SCHROEDER, M. (1990): Verdunstung von Land- und Wasserflächen in St. Arnold bei Rheine in den Jahren 1980 bis 1987.- Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen, 34 (4): 110-116; Koblenz.
- SCHROEDER, M. (1991): Bericht über die Interzeptionsmessungen auf der Großlysimeteranlage St. Arnold im Abflussjahr 1988.- Maschinenmanuskript des Staatlichen Amtes für Wasser- und Abfallwirtschaft Münster vom Januar 1991: 26 S.; Münster (unveröffentlicht).
- SCHROEDER, M. (1992): 25 Jahre Großlysimeteranlage St. Arnold.- Bericht des Staatlichen Amtes für Wasser- und Abfallwirtschaft Münster Mai 1992: 33 S.; Münster (unveröffentlicht).

- SCHROEDER, M. & BRAUN, G. (1976): Simulation vertikaler Wasserflüsse in einem Lysimeter.- Wasser und Boden, 28 (1): 8-13; Hamburg, Berlin.
- SCHROEDER, M. & GÜNTHER, K.-H. (1979): Wald und Grundwasser.- Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau, 41: 71-88; Hamburg, Berlin.
- SCHROEDER, M. & WYRWICH, D. (1990): Eine in Nordrhein-Westfalen angewendete Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung.- Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen, 34 (1/2): 12-16; Koblenz.
- SCHWERPUNKTAUFGABE WALDBAU UND FORSTVERMEHRUNGSGUT, LEHR- UND VERSUCHSFORSTAMT ARNSBERGER WALD, LANDESBETRIEB WALD UND HOLZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2016): Ergebnisse der Lichtmessungen vom 28. Juli 2016 an der Lysimeteranlage St. Arnold; Arnsberg (unveröffentlicht).
- SIEKER, F. & VERWORN, H.-R. (1985): Statistische Auswertungen des Niederschlags für die Station St. Arnold 1965 – 1985.- Auswertungsdokument des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover Dez. 1985: 34 S.; Hannover.
- SINCLAIR, J.D. & PATRIC, J.H. (1959): The San Dimas disturbed soil lysimeters.- Publication International Association of Scientific Hydrology, 49: 116-125; Gentbrugge (Symposium, 8.-13. September 1959 in Hannoversch-Münden).
- STURTEVANT, E.L. (1882): Four years observations with a lysimeter at South Framingham, Mass.- Proceedings of the American Association for the Advancement of Science. Thirteenth Meeting held at Cincinnati, Ohio, August 1881: 37-39; Salem, MA (The Salem Press, ed. F.W. Putnam).
- SUTMÖLLER, J. (2014): Grundwasserneubildung unter BZE-Punkten.- Waldzustandsbericht 2014 Sachsen-Anhalt: 33-35; Göttingen (Nordwestdeutsche forstliche Versuchsanstalt, Abteilung Umweltkontrolle, Sachgebiet Wald- und Bodenzustand).
- THIERMANN, A. (1973): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000, Erläuterung zu Blatt 3710 Rheine. Mit Beiträgen von DUBBER, H.-J. & KALTERHERBERG, J. & KOCH, M. & REHAGEN, H.-W. - 174 S.; Krefeld (Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen).
- THORNTHWAITE, C.W. & HOLZMANN, B. (1939): The determination of evaporation from land and water surfaces.- Monthly Weather Review, 67: 4-11; Washington, D.C.
- THORNTHWAITE, C.W. & HOLZMANN, B. (1942): Measurement of evaporation from land and water surfaces.- U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin, 817: 143 pp.; Washington, D.C.
- UHLIG, S. (1956): Die Lysimeteranlage in Castricum (Nordholland).- Wasserwirtschaft, 47: 42-43; Stuttgart.
- VAN GRINSVEN, J.J.M. & WESSELINK, L.G. & SCHROEDER, M. & VAN BREMEN, N. (1991): Soil acidification and solute budgets for forested lysimeters in Nordrhein-Westfalen.- Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde, 154 (3): 181-188; Weinheim.

- VAN HELMOND, J.B. (1648): *Ortus Medicinae. Id est, initia physicae inaudita. Progressus medicinae novus, in morborum ultionem, ad vitam longam.*- 939 S.; Amsterodami (Ludovicum Elzevirium).
- VAN DER HOEVEN, P.C.T. (2011): *Lysimeteranlage Castricum . Zusammenfassung und Datenreihen PWN-KNMI 1941 – 1997.*- 54 S.; Wageningen. Online-Datei: <http://www.climatexchange.nl/projects/verdamping.htm>
- VON LIEBIG, J. (1865): *Die Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie, Bd. II, Die Naturgesetze des Feldbaus.*- 511 S.; Braunschweig (Vieweg).
- VON SEELHORST, C. (1902): *Mitteilungen vom landwirtschaftlichen Versuchsfelde der Universität Göttingen. Vegetationskästen zum Studium des Wasserhaushaltes im Boden.*- *Journal für Landwirtschaft*, 50: 277-280; Berlin.
- WAY, J.T. (1850): *On the power of soils to absorb manure.*- *Journal of the Royal Agricultural Society of England*, 11: 313-379; London.
- WEIß, J. (1992): *Klimatologische Analyse der 25jährigen Wetterdaten der Großlysimeteranlage St. Arnold für die gewässerkundlichen Rahmenpläne „Ijsselmeerzuflüsse“ und „Ems-Münster“.*- Bericht des Staatlichen Amtes für Wasser- und Abfallwirtschaft Münster August 1992: 68 S.; Münster (unveröffentlicht).
- WEIß, J. & WERNER J. & SULMANN, P. (2002): *Erfahrungen mit dem „Tunnel“-Verdunstungsmesser beim Einsatz auf Grünflächen.*- *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 46, (5): 201-207; Koblenz.
- WERNER, J. (1980): *Ein vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der Aktuellen Evapotranspiration (AET) von Waldbeständen.*- *Die Wasserwirtschaft*, 70 (7/8): 270-274; Stuttgart.
- WERNER, J. (1985): *Die Erprobung einer vereinfachten energetischen Verdunstungs-Bestimmungsmethode an den Waldbeständen der Großlysimeteranlage St. Arnold bei Rheine 1981/82.-1985.*- LWA-Schriftenreihe, 40: 44 S.; Düsseldorf (Landesamt für Wasser und Abfall NRW).
- WERNER, J. (2000): *Die Erprobung einer neuen Messanordnung zur Verdunstungsbestimmung an Grünland.*- *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 44 (2): 64-69; Koblenz.
- WERNER, J. & GRAF, A. & VORNHOLT, G. & SULMANN, P. (2006): *Die Erprobung einer neuen Messanordnung zur Verdunstungsbestimmung an Waldbeständen.*- *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50 (5): 234-240; Koblenz.
- WERNER, J. & SWETER, J. & BRAUN, G. (1976): *Ein integrierender kinetischer Verdunstungsmesser für Binnengewässer.*- *Beiträge zur Hydrologie*, 4: 1-28; Freiburg.

---

Landesamt für Natur, Umwelt und  
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10  
45659 Recklinghausen  
Telefon 02361 305-0  
poststelle@lanuv.nrw.de

[www.lanuv.nrw.de](http://www.lanuv.nrw.de)